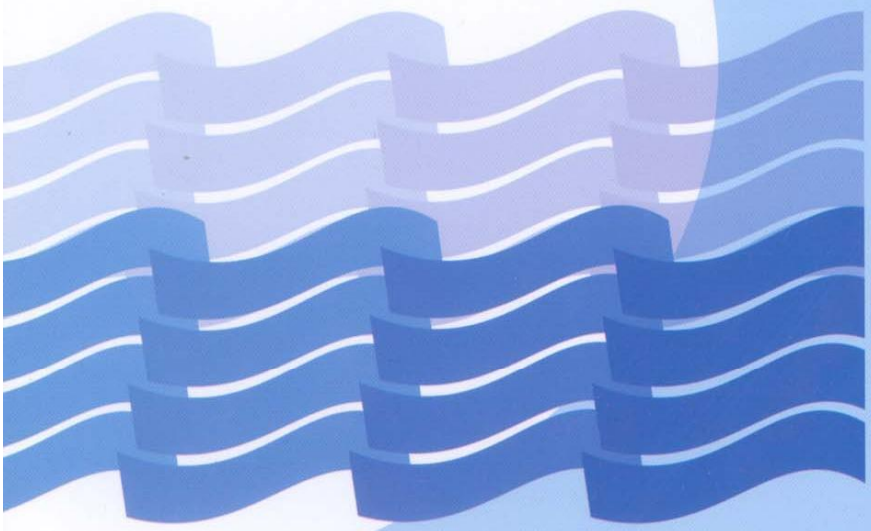
وزارت نیرو
معاونت امور آب و آبفا
دفتر مهندسی و معیارهای فنی
آب و آبفا

پیش‌نویس

راهنمای تهیه مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی



نشریه شماره ۳۳۷ - الف

پیش‌نویس

راهنمای تهیه مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی

نشریه شماره ۳۳۷- الف

پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی ناشی از به‌کارگیری مناسب و مستمر آنها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب‌ناپذیر ساخته است. نظر به وسعت دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی – تخصصی واگذار شده است.

با در نظر گرفتن مراتب فوق و با توجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، تهیه استاندارد در بخش آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و از این رو طرح تهیه ضوابط ومعیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو با همکاری معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور به منظور تامین اهداف زیر اقدام به تهیه استانداردهای صنعت آب نموده است:

- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرح‌ها
- پرهیز از دوباره‌کاری‌ها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- تدوین استانداردهای صنعت آب با در نظر داشتن موارد زیر صورت می‌گیرد:
- استفاده از تخصص ها و تجارب کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و ماخذ معتبر و استانداردهای بین المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاه‌های اجرایی، سازمان‌ها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- توجه به اصول و موازین مورد عمل موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر موسسات معتبر تهیه‌کننده استاندارد

استانداردها ابتدا به صورت پیش‌نویس برای نظرخواهی منتشر شده و نظرات دریافتی پس از بررسی تیم تهیه‌کننده و گروه نظارت در نسخه نهایی منظور خواهد شد.

امید است کارشناسان و صاحب‌نظرانی که فعالیت آنها با این رشته از صنعت آب مرتبط می باشد، با توجهی که مبذول می‌فرمایند این پیش‌نویس را مورد بررسی دقیق قرار داده و با ارایه نظرات و راهنمایی‌های ارزنده خود به دفتر طرح، این دفتر را در تنظیم و تدوین متن نهایی یاری و راهنمایی فرمایند.

ترکیب اعضای تهیه‌کننده، کمیته و ناظران تخصصی

این پیش‌نویس استاندارد در **موسسه تحقیقات آب با مسئولیت آقای مهندس حمیدرضا جهانی** تهیه شده است اسامی افرادی که در تهیه این پیش‌نویس همکاری نموده‌اند به ترتیب حروف الفبا به شرح زیر است:

اصغر بهلولی	موسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس هیدرولیک
حمید رضا جهانی	موسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس‌آب زیرزمینی
مجید خیاط خلقی	دانشکده‌کشاورزی‌دانشگاه‌تهران	دکترای آب زیرزمینی
مرتضی‌کلاهدوزان	موسسه تحقیقات آب	دکترای هیدرولیک
فریدون قاسمی	کارشناس آزاد	دکترای منابع آب
فرشاد لطفی آزاد	موسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس هیدرولیک
بایرامعلی محمدنژاد	موسسه تحقیقات آب	دکترای هیدرولیک
حمیدرضا ناصری	دانشگاه شهید بهشتی	دکترای آب زیرزمینی
جواد برادریاوری	شرکت مدیریت منابع آب‌ایران	فوق‌لیسانس‌آب‌زیررزمینی
عبدالباسط هلال‌بیگی	موسسه تحقیقات آب	فوق‌لیسانس منابع آب

گروه نظارت که مسئولیت نظارت تخصصی بر تدوین این پیش‌نویس استاندارد را به عهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا عبارتند از:

عبدالوحید آغاسی	دانشگاه خواجه نصرالدین طوسی	دکترای منابع آب
فیروزه امامی	کارشناس آزاد	لیسانس زمین‌شناسی
عبدالرحیم‌صلوی‌تبار	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس منابع آب
همایون کتیبه	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای آب زیرزمینی

اسامی اعضاء کمیته تخصصی مدیریت منابع آب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور که بررسی و تایید پیش‌نویس حاضر را بر عهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفباء عبارتند از:

احمد ابریشم‌چی	دانشگاه صنعتی شریف	دکترای منابع آب
عبدالوحید آغاسی	دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی	دکترای منابع آب
مریم رحیمی فراهانی	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور- وزارت نیرو	فوق لیسانس عمران آب
صدیقه ترابی	وزارت نیرو	دکترای منابع آب
بهرام ثقفیان	مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری	دکترای منابع آب
فضلعلی جعفریان	شرکت مدیریت منابع آب ایران	لیسانس زمین‌شناسی
عباسقلی جهانی	کارشناس آزاد	فوق لیسانس هیدرولوژی
پیمان دانش‌کارآراسته	دانشگاه بین‌المللی امام خمینی	دکترای علوم و مهندسی آبیاری
چنگیز فولادی	شرکت پیماب	دکترای هیدرولیک
جمشید موسوی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای منابع آب

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	**!!۱**
فصل اول - هدف و دامنه کاربرد	**!!۳**
۱-۱- هدف	۵
۱-۲- دامنه کار	۵
فصل دوم - مدل ریاضی جریان آب‌های زیرزمینی (با تاکید بر روش عددی تفاضل‌های محدود)	**!!۷**
۲-۱- مقدمه	۹
۲-۱-۱- تعریف مدل	۹
۲-۱-۲- تاریخچه مدل‌های آب زیرزمینی و مسایل موجود در این زمینه در کشور	۹
۲-۱-۳- مدل آب زیرزمینی به عنوان یک ابزار مدیریتی	۱۱
۲-۲- اطلاعات مورد نیاز در مطالعات مدل ریاضی آب زیرزمینی	۱۳
۲-۲-۱- داده‌های منابع آب - هواشناسی	۱۳
۲-۲-۲- پارامترها	۱۷
۲-۳- خطاهای آمار پایه منابع آب زیرزمینی در فرآیند جمع‌آوری،انتقال و ذخیره‌سازی	۱۸
۲-۴- پروتکل مدل‌سازی	۲۰
۲-۵- انواع مدل‌های جریان آب زیرزمینی	۲۲
۲-۵-۱- مدل‌های فیزیکی	۲۲
۲-۵-۲- مدل‌های تشابهی	۲۲
۲-۵-۳- مدل‌ها با روش‌های مختلف	۲۴
۲-۵-۴- مدل‌های ریاضی	۲۵
۲-۵-۵- بر اساس رابطه علت و معلول	۲۵
۲-۵-۶- بر اساس نوع فرآیند	۲۵
۲-۵-۷- بر اساس ابعاد مکانی	۲۶
۲-۵-۸- بر اساس وضعیت تخلخل محیط جریان	۲۶
۲-۵-۹- بر اساس نوع روش حل معادلات	۲۷
۲-۵-۱۰- بر اساس هدف مدل‌سازی	۲۸
۲-۶- مدل مفهومی	۲۹
۲-۶-۱- اهداف تهیه مدل مفهومی	۲۹
۲-۶-۲- مراحل مختلف تهیه مدل مفهومی	۳۰

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۲-۷- روش‌های حل عددی معادلات و روش برنامه‌ریزی پویا در مدل‌های ریاضی	۳۲
۲-۷-۱- روش تفاضل‌های محدود	۳۳
۲-۷-۲- روش اجزا محدود	۳۵
۲-۷-۳- روش برنامه‌ریزی پویا	۳۸
۲-۸- ویژگی‌های نرم افزارهای موردنیاز	۳۹
۲-۸-۱- نکته‌های مهم در انتخاب کد و رابط گرافیکی	۴۰
۲-۸-۲- بخش‌های مختلف برنامه	۴۱
۲-۹- معیارهای تقسیم‌بندی گستره مدل به اجزای کوچک‌تر	۵۰
۲-۹-۱- اهداف تقسیم‌بندی منطقه مدل	۵۰
۲-۹-۲- معیارهای مهم در طراحی شبکه منطقه مدل	۵۱
۲-۱۰- میان‌یابی داده‌ها و توزیع آنها بر روی گره‌های مدل	۵۲
۲-۱۰-۱- تطبیق پارامترها با نوع مدل	۵۲
۲-۱۰-۲- درون‌یابی یا میان‌یابی	۵۳
۲-۱۱- شرایط مرزی و شرایط اولیه	۵۶
۲-۱۱-۱- شرایط مرزی	۵۶
۲-۱۱-۲- انواع اصلی شرایط مرزی	۵۸
۲-۱۱-۳- تشخیص انواع شرایط مرزی	۵۸
۲-۱۱-۴- ایجاد مرزهای فرضی (مصنوعی) برای محدود کردن سامانه	۶۰
۲-۱۱-۵- ارتباط شرط مرزی و روش محاسبات	۶۱
۲-۱۱-۶- شرایط اولیه	۶۲
۲-۱۲- واسنجی مدل در شرایط ماندگار و غیرماندگار	۶۴
۲-۱۳- انتخاب دوره تنش و گام زمانی مناسب	۶۶
۲-۱۳-۱- انتخاب دوره تنش مناسب جهت واسنجی مدل	۶۶
۲-۱۳-۲- انتخاب گام زمانی مناسب با توجه به نوع مساله و مدل انتخاب شده	۶۷
۲-۱۳-۳- روش تفاضل‌های محدود	۶۷
۲-۱۳-۴- روش اجزای محدود	۶۹
۲-۱۳-۵- تغییرات گام زمانی در طول محاسبات	۶۹

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۲-۱۴- اعمال عوامل تغذیه و تخلیه در شبکه و در هرگام زمانی	۶۹
۲-۱۴-۱- تغذیه و تخلیه در سامانه آب زیرزمینی	۷۰
۲-۱۴-۲- چاه‌های پمپاژ و تزریق	۷۱
۲-۱۴-۳- تغذیه و تخلیه در مدل‌های تفاضل محدود	۷۱
۲-۱۴-۴- تغذیه و تخلیه در روش اجزای محدود	۷۴
۲-۱۴-۵- جریان از سطح ایستاب	۷۵
۲-۱۴-۶- تخمین جریان‌های عبوری از سطح ایستابی	۷۵
۲-۱۴-۷- مدل‌سازی بیلان آب	۷۶
۲-۱۴-۸- نشت	۷۷
۲-۱۵- ارزیابی عدم قطعیت در پیش‌بینی مدل	۷۹
۲-۱۵-۱- لزوم ارزیابی عدم قطعیت	۷۹
۲-۱۵-۲- روش‌های ارزیابی عدم قطعیت	۷۹
۲-۱۵-۳- تحلیل حساسیت	۷۹
۲-۱۵-۴- روش مونت کارلو	۸۲
۲-۱۵-۵- موارد ویژه ارزیابی عدم قطعیت درمدل‌های آب زیرزمینی	۸۴
۲-۱۵-۶- عدم قطعیت در آبدهی مجاز	۸۴
۲-۱۵-۷- عدم قطعیت در تنش‌های سامانه	۸۴
۲-۱۵-۸- عدم قطعیت در پارامترهای آبخوان	۸۵
۲-۱۵-۹- روش‌های کاهش عدم قطعیت	۸۶
۲-۱۶- ارائه نتایج (گزارش نهایی مدل)	۸۶
۲-۱۶-۱- ثبت مراحل مختلف فعالیت‌ها در مدل‌سازی	۸۶
۲-۱۶-۲- گزارش نهایی	۸۷
۲-۱۶-۳- نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۹۲
۲-۱۶-۴- پیوست‌ها	۹۲
فصل سوم- مدل ریاضی کیفی آب‌های زیرزمینی	**۹۳!!**
۳-۱- مبانی مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی	۹۵
۳-۱-۱- آلودگی غیرمتمرکز یا توزیعی یا آلودگی با منبع غیرنقطه‌ای	۹۵
۳-۱-۲- آلودگی متمرکز یا موضعی یا آلودگی با منبع نقطه‌ای	۹۶

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۱-۳- آلودگی خطی	۹۷
۳-۱-۴- اهداف مدل‌سازی کیفی آبخوان	۹۸
۳-۱-۵- فرآیند مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی	۱۰۰
۳-۱-۶- تهیه مدل مفهومی	۱۰۲
۳-۲- پدیده انتقال املاح و معادلات پایه کیفیت آب‌های زیرزمینی	۱۰۳
۳-۲-۱- پدیده انتقال	۱۰۳
۳-۲-۲- پخشیدگی	۱۰۳
۳-۲-۳- ورودی و خروجی‌ها	۱۰۳
۳-۲-۴- واکنش شیمیایی	۱۰۳
۳-۲-۵- جذب رادیواکتیو	۱۰۳
۳-۲-۶- شرایط اولیه	۱۰۳
۳-۲-۷- حل عددی معادلات انتقال و پخش آلودگی در آبخوان	۱۰۳
۳-۲-۸- نگرش تلفیقی اولرین - لاگرانژین	۱۰۳
۳-۲-۹- نگرش لاگرانژین	۱۰۳
۳-۲-۱۰- پدیده جابه‌جایی و پخشیدگی	۱۰۳
۳-۳- انتخاب مدل عددی و نرم افزار مناسب برای آبخوان	۱۰۳
۳-۳-۱- معیارهای انتخاب مدل مناسب	۱۰۳
۳-۴- شبکه‌بندی، شرایط مرزی، شرایط اولیه، عوامل تغذیه و تخلیه و پارامترهای مدل	۱۰۳
۳-۴-۱- شبکه‌بندی آبخوان	۱۰۳
۳-۴-۲- شبکه‌بندی مکانی یا تقسیم‌بندی مکانی	۱۰۳
۳-۴-۳- شبکه‌بندی زمانی یا تقسیم‌بندی زمانی	۱۰۳
۳-۴-۴- شرایط مرزی	۱۰۳
۳-۴-۵- شرط مرزی غلظت معلوم	۱۰۳
۳-۴-۶- شرط مرزی تغییرات غلظت معلوم	۱۰۳
۳-۴-۷- نقش شرایط مرزی مدل کمی در حمل مواد	۱۰۳
۳-۴-۸- مقایسه بین شرایط مرزی در مدل‌های جریان و آلودگی	۱۰۳
۳-۴-۹- مساله مقیاس در شبیه‌سازی جریان و حمل مواد	۱۰۳

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۴-۱۰- شرایط اولیه	۱۰۳
۳-۴-۱۱- عوامل تغذیه و تخلیه	۱۰۳
۳-۴-۱۲- مدیریت داده‌ها	۱۰۳
۳-۴-۱۳- پیش پردازش، پس پردازش	۱۰۳
۳-۴-۱۴- استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)	۱۰۳
۳-۴-۱۵- پارامترهای ورودی مدل	۱۰۳
۳-۵- واسنجی مدل کیفی آب‌های زیرزمینی و تحلیل حساسیت	۱۰۳
۳-۵-۱- روش سعی و خطا	۱۰۳
۳-۵-۲- روش خودکار واسنجی	۱۰۳
۳-۵-۳- صحت‌سنجی مدل	۱۰۳
۳-۶- کاربرد مدل کیفی در مدیریت آبخوان	۱۰۳
۳-۷- ارائه نتایج و گزارش نهایی مدل با ذکر یک مطالعه موردی	۱۰۳
۳-۷-۱- بررسی یک نمونه مطالعه موردی	۱۰۳
فصل چهارم- مطالعه موردی	**۱۰۳!!**
۴-۱- مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت بردسیر کرمان	۱۰۳
۴-۲- خلاصه	۱۰۳
۴-۳- مقدمه و کلیات	۱۰۳
۴-۴- وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی	۱۰۳
۴-۴-۱- زمین‌شناسی	۱۰۳
۴-۴-۲- توپوگرافی و ریخت شناسی	۱۰۳
۴-۴-۳- هیدروژئولوژی	۱۰۳
۴-۵- طراحی مدل	۱۰۳
۴-۵-۱- معرفی کد و رابط گرافیکی	۱۰۳
۴-۵-۲- رابطه بین مدل مفهومی و مدل عددی	۱۰۳
۴-۵-۳- واسنجی	۱۰۳
۴-۵-۴- آنالیز حساسیت	۱۰۳
۴-۵-۵- ارزیابی مدل	۱۰۳
۴-۵-۶- پیش‌بینی	۱۰۳

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۴-۵-۷- محدودیت‌های مدل	۱۰۳
۴-۵-۸- نتیجه گیری و پیشنهادها	۱۰۳
پیوست ۱-پرسشنامه ارزیابی مدل آب زیرزمینی	**۱۰۳!!**
پیوست ۲- واژه‌نامه	**۱۰۳!!**
منابع و مراجع	**۱۰۳!!**

مقدمه

افزایش بی‌رویه جمعیت در کشور، محدودیت منابع آب‌های سطحی و بهره‌برداری بیش از اندازه از آبخوان‌ها باعث وارد آمدن خسارات جبران‌ناپذیری به منابع طبیعی کشور در سال‌های گذشته شده است. علاوه بر افت شدید سطح آب در آبخوان‌ها، فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری آلاینده‌های مختلفی را به آبخوان‌ها تحمیل می‌کنند که برای جلوگیری از ادامه افت کمی و کیفی، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی باید به عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های کشور قرار گیرد. در این رابطه، مدل ریاضی در صورت شناخت درست و به شرط آماده بودن زمینه، می‌تواند به عنوان یک ابزار کارا در اختیار مدیران قرار گیرد.

مدل ریاضی آب زیرزمینی شبیه‌سازی یک سامانه هیدروژئولوژیکی است که از قوانین فیزیک و ریاضی کمک می‌گیرد. دو مولفه اساسی آن مدل مفهومی (conceptual) و مدل ریاضی (mathematical) می‌باشند. مدل مفهومی در حقیقت تصویر ساده شده‌ای از سامانه می‌باشد. مدل ریاضی، مجموعه‌ای از فرمول‌های ریاضی است که با توجه به فرضیات خاص، به فرایندهای فیزیکی فعال در درون سامانه آبخوان مقدار می‌بخشد. بدیهی است که مدل به خودی خود جزییات واقعی سامانه آب زیرزمینی را شامل نمی‌شود، ولی رفتار یک مدل معتبر تقریبا نشان‌دهنده رفتار آبخوان می‌باشد. مدل آب زیرزمینی ابزاری در اختیار می‌دهد تا بتوان داده‌های موجود را تبدیل به ویژگی‌های عددی برای سامانه آب زیرزمینی نمود. چنین مدلی تا حد مقبولی نماینده سامانه آب زیرزمینی خواهد بود و این امکان را به کارشناس می‌دهد که بتواند واکنش سامانه در برابر تنش‌های هیدرولوژیکی (hydrological stresses)[۱] مثل آبیاری یا پمپاژ را به صورت عددی نشان دهد.

خوشبختانه در کشور ما نیز در چند سال گذشته اهمیت نقش مدل‌سازی کمی و کیفی در مدیریت آبخوان در حال گسترش بوده است. در این میان آنچه توجه جدی کارفرمایان و دست‌اندرکاران مدیریت حوضه‌های آبریز کشور را می‌طلبد، لزوم گسترش و بازنگری جدی در سامانه پایش کمی و کیفی و شبکه‌های نمونه‌برداری آبخوان‌ها است. شکی نیست شبکه‌های پایش و نمونه‌برداری، تامین‌کننده اصلی داده‌های مورد نیاز برای مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی کشور می‌باشند و یکی از دلایل عمده ضعف مدل‌های تهیه شده نقص داده‌ها یا نادرست بودن آنها بوده است. بنابراین مهم‌تر از تهیه مدل ریاضی درهر حوضه، ایجاد یک سامانه پایش و نمونه‌برداری مناسب برای آبخوان منطقه می‌باشد که با توجه به نیازهای مدل، طراحی و راه‌اندازی شده باشد.

---

۱ – به عوامل بیرونی موثر بر آبخوان مانند برداشت، تغذیه، تبخیر، تعرق، بارندگی و... تنش‌های وارد بر سیستم گفته می‌شود.

فصل ۱

هدف و دامنه کاربرد

۱-۱- هدف

اهداف عمومی‌از 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 میـزان نفـوذ و می‌پردازد.

۱-۲- دامنه کار

دامنه کار در دو بخش راهنمای تهیه مدل ریاضی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی شامل تهیه مدل مفهومی با توجه به داده‌های موجود و استفاده از روش‌های عددی به ویژه روش تفاضل محدود در تهیه مدل ریاضی آبخوان می‌باشد. در این راهنما فرض بر این است که روش‌های تهیه بیلان آب زیرزمینی و برآورد پارامترهای گوناگون آن روشن بوده و بنابراین به آن پرداخته نشده است. همچنین مدل‌سازی‌های تخصصی همچون سطح تماس آب شور و شیرین، تراوش در محیط غیر اشباع، ... موضوع بحث در این راهنما نمی‌باشند.

فصل ۲

مدل ریاضی جریان آب‌های زیرزمینی (با تاکید بر روش عددی تفاضل‌های محدود)

۲-۱- مقدمه

۲-۱-۱- تعریف مدل

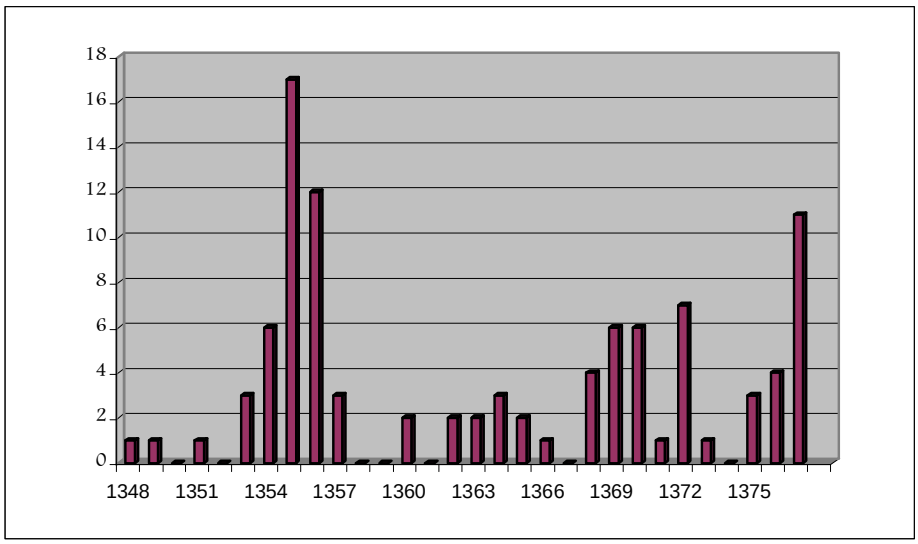
مدل به مفهوم نمایش یک پدیده حقیقی و یا نمایش مادی یک پدیده است که هدف آن واضح ساختن رفتار پدیده حقیقی تحت شرایط خاص می‌باشد. در مبحث آب‌های زیرزمینی، مدل توسط محققین به صورت‌های مختلف تعریف شده است که تمام تعاریف در مفهوم مشابه می‌باشند. دومنیکو [۱۷] مدل را بیانی از یک واقعیت می‌داند که سعی دارد مفاهیم و رفتار آن را به گونه‌ای شرح دهد که همواره پیچیدگی کم‌تری نسبت به سامانه واقعی داشته باشد. یک سامانه واقعی مانند یک آبخوان، متشکل از مجموعه‌ای از فرآیندها و پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی است. بیان کمی و کیفی این پدیده‌ها و شناخت رفتار سامانه از طریق معادلات حاکم و مدل‌ها صورت می‌گیرد. تعریف مدل باید مبتنی بر وضعیت هندسی دقیق سامانه مورد مطالعه (به عنوان مثال لایه آبدار) و اطلاعاتی درباره پارامترهای فیزیکی مرزهای ورودی و خروجی‌های آن سامانه باشد.

۲-۱-۲- تاریخچه مدل‌های آب زیرزمینی و مسایل موجود در این زمینه در کشور

دوره جدید هیدرولوژی آب‌های زیرزمینی از سال ۱۹۳۵ با معادله تایس[۱] آغاز گردید. در دهه‌های ۴۰ و ۵۰ میلادی ژاکوب[۲] و هانتوش[۳] روابطی را در زمینه حل مسایل جریان چاه‌ها ارائه نمودند. از همین زمان بود که روش‌های نظری در حل مسایل آب‌های زیرزمینی بسیار معمول گردید و اکثر فرمول‌ها و روش‌های تجربی در قالب معادلات ریاضی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در دهه ۱۹۵۰ میلادی بنت[۴] و اسکیویتزکی[۵] در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده[۶]، یک سامانه آبخوان را با استفاده از شبیه‌سازی الکتریکی که مجموعه‌ای از مقاومت‌ها و اسیلوسکوپ‌ها بود و بر اساس روش تفاضل محدود عمل می‌کرد، مدل‌سازی الکتریکی نمودند [۱۴]. یکی از مزایای شبیه‌سازی مذکور در آن است که تفکیک زمانی صورت نگرفته و زمان به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود که این مساله موجب می‌شد مدل بی‌قید و شرط ماندگار باشد. وجود ماشین‌های حسابگر سریع و کامپیوترهای دیجیتال در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی باعث گردید که بسیاری از مسایل پیچیده آب‌های زیرزمینی مدل شود. در دهه ۱۹۵۰ ریاضی‌دانان و مهندسین مخازن نفت روش‌های حل عددی را برای معادله جریان در صنعت نفت مورد آزمایش قرار دادند و از آن زمان به بعد این روش نیز به مجموعه مدل‌ها پیوست. این در حالی بود که هنوز مدل‌های تشابهی برای حل جریان یک سیال منفرد استفاده می‌شد، ولی نمی‌توانست برای مسایل چند فازی به آسانی استفاده شود. این نارسایی موجب شد که مدل‌های عددی سیر تکاملی خود را تا امروز طی کنند. به طوری که از دهه ۱۹۷۰ به بعد استفاده از مدل‌های تشابهی تقریبا کنار گذاشته شد و روش‌های عددی در حل مسایل آب‌شناسی بسیار متداول شد و برنامه‌های زیادی به زبان‌های برنامه‌نویسی مختلف توسط افراد مختلف نوشته شد.

1- Theis
2- Jacob
3- Hantush
4- Bennett
5- Skivitzke
6- USGS

مطالعات مدل‌سازی در ایران برای اولین بار در سال ۱۳۴۸ خورشیدی 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 دانشگاه‌ها در قالب پایان‌نامه‌های دانشجویی و طرح‌های پژوهشی در مراکز تحقیقاتی و شرکت های مشاوره‌ای و سازمان‌های آب منطقه‌ای شبیه‌سازی شده‌اند. نمودار ۲-۱ اطلاعات مربوط به تعداد و زمان تهیه مدل‌هایی را نشان می‌دهد که تا سال ۱۳۷۸ زیر نظر سازمان‌های آب منطقه‌ای کشور تهیه شده است. [۴]



نمودار ۲-۱- تعداد مدل‌های تهیه شده در کشور در سال‌های مختلف [٤]

مطالعات مربوط به مدل آب‌های زیرزمینی در ایران از دیرباز تا کنون 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 نهشته‌های آبرفتی دشت‌ها که اصلی‌ترین مخزن آب‌های زیرزمینی می‌باشد.
- نبود آمار و اطلاعات کامل و منظم از پارامترهای هواشناسی و اقلیم‌شناسی در محدوده دشت‌ها برای برآورد مولفه‌های بیلان آب
- نبود یک شبکه پیزومتری مناسب یا ناکافی بودن تعداد پیزومترها در محدوده دشت به منظور واسنجی مدل
- نبود چاه‌های اکتشافی کافی در محدوده‌ی دشت‌ها به منظور شناخت خصوصیات فیزیکی و هندسی آبخوان‌ها (اعم از ضخامت تغییرات خصوصیات فیزیکی در عمق و در عرض موقعیت سنگ کف تخلخل و . . .)
- 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
- عدم شناخت کافی از مرز آب شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی و بعضی از دیگر آبخوان‌های آبرفتی دشت‌ها
- نبود اطلاعات کافی از ارتباط هیدرولیکی آب‌های سطحی (دریاچه‌ها رودخانه‌ها زهکش‌ها و ...) با آب زیرزمینی
- نبود آمار و اطلاعات کافی و دقیق جهت تهیه بیلان آبخوان‌های آبرفتی 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 میـزان نفـوذ سـطحی آب برگـشتی تبخیر و تعرق و ...
- نبود اطلاعات کافی در برآورد میزان آب برگشتی کشاورزی فاضلاب‌های شهری و صنعتی
- نبود یک دستورالعمل جامع و مناسب به منظور راهنمایی در تهیه مدل
- نبود نیروی با تجربه و متخصص و عدم رعایت ترکیب مناسب تخصص های مورد نیاز در پروژه مدل‌سازی (تیم کاری)
- عدم نظارت کافی بر مراحل و نتایج تهیه مدل
- نبود یک ارتباط علمی‌کافی و مناسب بین محیط‌های علمی و تحقیقاتی با سـازمان‌هـا و شـرکت‌هـای دسـت انـدرکار در مطالعات آب‌های زیرزمینی
- نبود یک رفتار سنجی مناسب پیوسته و دقیق از آبخوان‌ها

۲-۱-۳- مدل آب زیرزمینی به عنوان یک ابزار مدیریتی

مدل آب زیرزمینی یکی از ابزارهای مدیریتی است که برای حل موارد پیچیده مرتبط با سامانه‌های آب زیرزمینی به کار می‌رود (جدول ۲-۱). این ابزار تنها مولفه در مطالعه حوضه نبوده و با مدل‌های اقتصادی ـ اجتماعی و دیگر ابزارهای مدیریتی در ارتباط می‌باشد. اگر مدل به درستی تهیه شده باشد و در شرایط مناسب به کار گرفته شود، ابزار بسیار قدرتمندی در حل مساله خواهد بود. برای این منظور داده‌های دقیق و قابل اعتماد باید در دسترس بوده و تیم کاری مطالعات مدل نیز باید شامل افراد توانا و آگاه در هیدروژئولوژی و هیدرولوژی محلی باشند. ارتباط و بحث و گفتگو در رابطه با نتایج مدل بین تیم مدل‌سازی و کارفرما نیز به اندازه‌ی ابزارها و مهارت‌های مدل‌سازی با اهمیت است.

جدول ۲-۱- موارد کاربرد مدل در مسایل گوناگون مرتبط با آب های زیرزمینی

زمینه‌های مختلف	هدف‌ها	مسایل مورد بررسی
تاسیسات سطحی	ایجاد تاسیسات بر روی شبکه جریان‌های سطحی – سـدهای ذخیـره‌ای در داخـل و یـا خـارج از محدوده آبخوان – شبکه کانال‌های آبرسانی – برداشت آب از رودخانه‌هـایی کـه آبخـوان را تغذیه می‌کنند. – پوشش نهرها – تاسیسات تغذیه مصنوعی	– تغییرات سطح پیزومتری آبخوان در بالادست و پایین‌دست سـدها و محل پروژه‌های تغذیه مصنوعی – بده‌های نفوذی از کانال های آبرسانی – تاثیر پوشش نهرها در تغذیه آبخوان و تغییرات سطح پیزومتری – تغییرات ناشی از افزایش و یا کاهش تغذیه آبخـوان از جریـان‌هـای سطحی و تغذیه مصنوعی – کنترل تغذیه آبخوان با استفاده از تاسیسات سطحی
تاسیسات زیرزمینی	ایجاد سدهای زیرزمینی	– تغییرات سطح پیزومتری – تغییرات بده های خروجی زیرزمینی – تغییرات بیلان آبخوان – جلوگیری از نفوذ آب با کیفیت پایین
	ایجاد مجاری و زهکش‌های زیرزمینی	– تغییرات سطح پیزومتری – بده‌های زهکشی

ادامه جدول ۲-۱- موارد کاربرد مدل در مسایل گوناگون مرتبط با آب های زیرزمینی

زمینه‌های مختلف	هدف ها	مسایل مورد بررسی
آب شهری	برداشت از آبخوان با بده معلوم	– مدیریت بهره‌برداری از آبخوان شامل: – محل های برداشت – افت سطوح پیزومتری ناشی از عمل برداشت – تاثیر عمل برداشت در روی بده چاه‌های موجود و چشمه‌ها و قنات‌های مجاور – امکان تداخل آب های آلوده سطحی به داخل آبخوان و همچنین پیش‌روی جبهه های آب شور در مناطق مورد بهره‌برداری و در نتیجه خطر کاهش کیفیت آب
	تغذیه آبخوان از فاضلاب شهری و صنعتی	– بده های قابل تزریق – پیش‌بینی بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و خطرات باتلاقی شدن محدوده‌های شهری – بررسی کیفیت آب زیرزمینی – تاثیر نفوذ شیرابه زباله ها و تعیین محل مناسب برای دفن زباله های شهری
نواحی ساحلی	برداشت آب آشامیدنی بررسی تغییرات سطح تماس آب شور و شیرین	– محل مناسب برداشت با حداقل نفوذ آب شور به آبخوان آب شیرین
آب کشاورزی	آبیاری محدوده‌های کشاورزی	– بررسی امکانات توسعه بهره برداری از آبخوان برای تامین نیازهای آبی کشاورزی – میزان آب قابل بهره برداری – نهایی مناسب برداشت از آبخوان – تغذیه آبخوان از آب آبیاری و بررسی خطرات باتلاقی شدن زمین ها براثر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی – بررسی آب‌های نامناسب برای کشاورزی
	زهکشی اراضی	– افت سطح آب آبخوان در نتیجه ایجاد شبکه‌های زهکشی – تعیین بده های زهکشی و مشخصات زهکش‌ها

توصیه می‌شود که کارفرما یک کادر اجرایی فنی مرکب از کارشناسان هیدروژئولوژیست مجرب و کارشناس مدل آب زیرزمینی در اختیار داشته باشد تا در مراحل فنی، ارائه داده‌های موجود و نیز مرور طرح‌های پیشنهادی و گزارش‌ها همکاری نماید. اعضای این کادر باید از اطلاعات هیدروژئولوژی محلی کافی نیز برخوردار باشند و همچنین بتوانند نتایج بررسی‌های خود را با دیگر کارشناسان پروژه در ارتباط قرار دهند.

کادر اجرایی فنی پروژه باید از مهارت و تجربه کافی برخوردار بوده تا (در چارچوب مالی و زمانی موردنظر) از آن در طراحی مدل و تفسیر نتایج آن استفاده نماید.

برخی از مهارت‌های مورد نیاز عبارتند از:

- شناخت منطقه مورد مطالعه و هیدرولوژی سامانه آبخوان
- مهارت در طراحی مدل و استفاده از نرم افزار

- توانایی در برقراری ارتباط با سازمان‌ها و ارگان‌ها برای گردآوری داده‌ها و حل تناقض‌ها و عدم قطعیت‌ها در داده‌ها

پیش از آغاز هر گونه مطالعات مدل، آرشیوی از داده‌های موجود مورد نیاز می‌باشد. اگر مطالعات مدل به وسیله گروهی خارج از سازمان‌های آب منطقه‌ای انجام می‌گیرد، محل و چگونگی دسترسی به داده‌هایی که در اختیار ارگان‌های گوناگون قرار دارند، باید پیش از تهیه طرح اولیه مطالعه تعیین شود. این داده‌ها باید پیش از تهیه هر گونه طرح مدل به صورت کلی مورد ارزیابی قرار گیرند تا تناسب آنها برای مسایل مدیریتی و نوع مدل‌سازی مورد نیاز بررسی شود. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز در قسمت ۱-۴ ارائه شده است. گاه پس از بررسی داده‌ها ممکن است اهداف مطالعه مورد بازبینی قرار گرفته یا شبکه‌های جمع‌آوری داده‌ها به گونه‌ای که مورد نیاز مطالعات می‌باشند، تغییر یابند.

روش انتخابی برای مدل‌سازی باید همخوان با مجموعه داده‌های در دسترس و مدل مفهومی‌سامانه آب زیرزمینی موجود باشد. همچنین ضروری است مدل به اندازه کافی قابلیت انعطاف داشته باشد تا در صورت دسترسی به داده‌های بیش‌تر بتوان آن را به مدلی کامل‌تر تبدیل نمود و ازآن برای مدیریت بلند مدت سامانه آبخوان استفاده نمود.

۲-۲- اطلاعات مورد نیاز در مطالعات مدل ریاضی آب زیرزمینی

اطلاعات مورد نیاز مطالعات مدل ریاضی آب زیرزمینی به دو بخش داده‌های منابع آب و هواشناسی و پارامترهای هیدرودینامیکی، زمین‌شناسی و توپوگرافی تفکیک می‌شوند.

۲-۲-۱- داده‌های منابع آب - هواشناسی

این داده‌ها شامل داده‌های پایه و داده‌های سازه منابع آب هستند:

الف: داده‌های پایه

داده‌های پایه داده‌هایی هستند که از طریق مشاهده و اندازه‌گیری مستقیم حاصل می‌شوند. داده‌های پایه منابع آب در سه بخش منابع آب زیرزمینی، منابع آب سطحی و هواشناسی طبقه‌بندی می‌شوند:

- داده‌های پایه منابع آب زیرزمینی

- عمق سطح آب زیرزمینی

این داده‌ها از اندازه‌گیری سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای به‌دست می‌آید و معمولا به واحد متر بیان می‌شود. نتایج اندازه‌گیری در شبکه چاه‌های مشاهده‌ای، منجر به تهیه نقشه منحنی‌های هم عمق سطح آب زیرزمینی در طول دوره زمانی مدل و به تعداد گام‌های زمانی می‌شود. این داده همچنین به صورت نمودار تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای برای استفاده در مدل آماده می‌شود.

- آبدهی لحظه‌ای منابع آب زیرزمینی

آبدهی لحظه‌ای چاه‌های (عمیق و نیمه‌عمیق) بهره‌برداری، قنات‌ها، چشمه‌ها، چشمه‌سارها و زهکش‌ها از طریق مراجعه صحرایی و اندازه‌گیری مستقیم به وسیله لوازم مناسب تعیین می‌شود. واحد آن معمولا به لیتر بر ثانیه بیان می‌شود.

- آبدهی لحظه‌ای منابع آب انتخابی

از مجموع منابع تخلیه‌کننده آبخوان‌ها (چاه، چشمه، قنات، زهکش) تعدادی به عنوان معرف انتخاب و به صورت دوره‌ای (معمولا ماهانه و یا فصلی) از آنها اندازه‌گیری آبدهی لحظه‌ای به عمل می‌آید. حین اندازه‌گیری همچنین ساعات کارکرد روزانه منبع در طی دوره اندازه‌گیری یادداشت می‌شود. این ارقام در مرحله بعدی طی فرآیندی به آبدهی لحظه‌ای منابع آب زیرزمینی پیوند خورده و منجربه محاسبه میزان تخلیه منابع آب زیرزمینی خواهند شد.

- داده‌های پایه منابع آب سطحی

- ارتفاع اشل

ارتفاع اشل بر روی رودخانه‌هایی که این ابزار نصب گردیده به صورت روزانه در دو نوبت و در مواقع سیلابی هر دو ساعت یک بار قرائت و یادداشت شود. واحد آن معمولا به سانتی‌متر بیان می‌شود. ارقام به‌دست آمده در مرحله بعدی طی فرآیندی تبدیل به تخلیه یا تغذیه جریان سطحی خواهند شد.

- لیمینگراف ثبات

این وسیله در ساحل رودخانه‌ها نصب شده و تغییرات ارتفاع سطح آب را ثبت می‌کند. واحد آن معمولا به سانتی‌متر است. ارقام به‌دست آمده در مرحله بعدی طی فرآیندی تبدیل به تخلیه یا تغذیه جریان سطحی خواهند شد.

- داده‌های پایه هواشناسی

- ریزش‌های جوی

این داده که به واحد میلی‌متر بیان می‌شود در باران‌سنج‌های معمولی و ثبات اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس این داده‌ها در مرحله بعدی در طی پردازش‌های مختلف نقشه منحنی‌های هم‌باران تهیه خواهد شد. به‌علاوه در مناطق برف‌خیز، ارتفاع و چگالی برف در ایستگاه‌های برف‌سنجی اندازه‌گیری می‌شود.

- دما

واحد آن در کشور ما درجه سانتیگراد بوده و در ایستگاه‌های تبخیرسنجی وزارت نیرو و ایستگاه‌های کلیماتولوژی و سینوپتیک سازمان هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری دما شامل دمای معمولی، دمای خشک، دمای تر، دمای حداکثر، دمای حداقل می‌باشند.

- باد

سرعت و جهت وزش باد در ایستگاه‌های کلیماتولوژی و سینوپتیک سازمان هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود. واحد آن معمولا کیلومتر در ساعت است. در ایستگاه‌های هواشناسی وزارت نیرو نیز سرعت باد اندازه‌گیری می‌شود.

- تبخیر از تشت

ارتفاع تبخیر به صورت روزانه در ایستگاه‌های هواشناسی وزارت نیرو و سازمان هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود. واحد آن به میلی‌متر است. ظرف اندازه‌گیری تبخیر به تشت کلاس A معروف است.

- نم نسبی

این داده به درصد بیان شده و در ایستگاه‌های هواشناسی وزارت نیرو و سازمان هواشناسی به صورت روزانه ثبت می‌شود.

- سایر داده‌های هواشناسی

سایر داده‌های هواشناسی که در تامین برخی داده‌های سازه‌ای مورد نیاز مطالعات مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

- روزهای آفتابی
- تشعشع
- رطوبت خاک

ب: داده‌های سازه

داده‌های سازه داده‌هایی هستند که با استفاده از داده‌های پایه و طی پردازش‌های مختلف حاصل می‌شوند. این داده‌ها نیز همانند داده‌های پایه در سه بخش منابع آب زیرزمینی، منابع آب سطحی و هواشناسی قابل طبقه‌بندی می‌باشند:

- داده‌های سازه منابع آب زیرزمینی

- ارتفاع مطلق سطح آب زیرزمینی

این داده از طریق اندازه‌گیری سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای و با استفاده از میزان تراز سطح زمین در آن نقطه محاسبه می‌شود. با استفاده از تراز مطلق سطح آب زیرزمینی در سطح شبکه چاه‌های مشاهده‌ای، نقشه منحنی‌های تراز سطح آب زیرزمینی (خطوط هم پتانسیل) تهیه می‌شود. این داده همچنین به صورت نمودار تغییرات تراز سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای برای استفاده در مدل آماده می‌شود. شکل دیگر این داده، آبنمود معرف (هیدروگراف معرف) سطح آب زیرزمینی در طول دوره انتخاب شده برای مطالعات مدل است، که معمولا در محاسبات بیلان آب زیرزمینی به کار گرفته می‌شود.

- تخلیه منابع آب زیرزمینی

تخلیه چاه‌ها، چشمه‌ها، چشمه‌سارها، زهکش‌ها و قنات‌ها از طریق اندازه‌گیری آبدهی لحظه‌ای و با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از اندازه‌گیری آبدهی منابع آب انتخابی محاسبه می‌شود. واحد آن معمولا به متر مکعب در روز یا در ماه یا در سال بیان می‌شود.

- حجم آب ورودی و خروجی از مقاطع زیرزمینی

در مطالعات مدل ریاضی مقاطع ورودی و خروجی، ضروری است منطبق با مرزهای محدوده مدل خواهند بود. حجم آب ورودی و خروجی با استفاده از منحنی‌های هم تراز سطح آب زیرزمینی و با در نظر گرفتن میزان ضریب قابلیت انتقال و یا با در نظر گرفتن ضخامت آبخوان و ضریب هدایت هیدرولیکی محاسبه شده و معمولا به متر مکعب در روز یا در ماه و یا در سال بیان می‌شود.

- حجم آب نفوذ یافته از سطح زمین به درون آبخوان:

منظور هر گونه آبی است که به طور طبیعی (بستر رودخانه، دریاچه و ...) یا با دخالت انسان (مصرف آب در سطح مزارع، باغات، شهرها و آبادی‌ها، تغذیه مصنوعی و ...) به درون زمین نفوذ می‌کند. این موارد عبارتند از:

- نفوذ از آب آبیاری در سطح باغات و مزارع
- نفوذ از باران و برف
- نفوذ آب آبیاری در انهار
- نفوذ از جریان‌های سطحی در بستر مسیل‌ها و رودخانه‌ها
- نفوذ از کرانه و بستر دریا، دریاچه های طبیعی، باتلاق‌ها (معمولا شامل نفوذ واداری است)
- نفوذ از مصارف خانگی و شهری (چاه‌های جذبی و . . .)
- نفوذ از مصارف صنعتی (کارگاه‌ها، کارخانه‌ها و . . .)
- نفوذ از طریق طرح های تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب

مقدار نفوذ با توجه به میزان و زمان آب در دسترس و نفوذپذیری سطح زمین محاسبه شده و واحد آن معمولا متر مکعب در روز یا در ماه یا در سال است. یادآوری می‌شود که با وجود این‌که منشا بخشی از آب‌های فوق از آب‌های سطحی می‌باشد، ولی با توجه به این‌که درون آبخوان نفوذ می‌کنند در مقوله داده‌های سازه منابع آب زیرزمینی قرار داده شده‌اند.

- تغذیه و تخلیه از طریق سازندهای حاشیه دشت و سنگ کف:

محاسبه حجم چنین آبی معمولا بسیار مشکل بوده و اغلب با مجهول قرار دادن در معادله بیلان برآورد می‌شود. از آن‌جا که خصوصیات سازندها، گسل‌ها و سنگ کف غالبا ناشناخته هستند، از این‌گونه آب‌ها و به طور کلی آب‌هایی که در معادله بیلان به هیچ پارامتر شناخته شده‌ای منتسب نمی‌شوند با عنوان «آب مجهول» یا «آب با منشا نامعلوم» نام برده می‌شود.

- داده‌های سازه منابع آب سطحی:

- حجم جریان سطحی:

شامل حجم آبی است که در یک فاصله زمانی از مقطع مشخصی از بستر مسیل، رودخانه، کانال و . . . عبور می‌کند و به متر مکعب در روز یا در ماه یا در سال بیان می‌شود. این آب از طریق اندازه‌گیری در اشل، لمینگراف، مقطع اندازه‌گیری و ... و بر اساس پردازش‌های مختلف حاصل می‌شود.

- داده‌های سازه هواشناسی

- ارتفاع بارش

عبارت از توزیع ارتفاع بارش در سطح محدوده مطالعات مدل ریاضی است که به صورت نقشه منحنی‌های هم باران ارائه می‌شود. نقشه‌هایی که در این رابطه تهیه می‌شوند شامل نقشه هم باران متوسط درازمدت و نقشه‌های هم باران گام‌ها و دوره های زمانی انتخاب شده در مطالعات مدل می‌باشند.

- حجم بارش:

حجم بارش از طریق پردازش نقشه‌های هم‌باران حاصل می‌آید.

- تبخیر و تعرق:

این داده به صورت نقشه منحنی‌ها یا زون‌های هم تبخیر و تعرق با استفاده از نتایج اندازه‌گیری تبخیر در ایستگاه‌های هواشناسی یا به روش‌های تجربی و با پردازش‌های لازم ارائه می‌شود.

۲-۲-۲- پارامترها

پارامترهای مورد نیاز مدل به خصوصیات فیزیکی سطح و زیر سطح زمین در محدوده مطالعات مدل ریاضی از جمله ویژگی‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، مورفولوژی و . . . مربوط می‌شوند. این پارامترها عبارتند از:

- ضریب هدایت هیدرولیکی

از طریق تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش پمپاژ چاه‌های اکتشافی یا بهره‌برداری و یا از طریق روش‌های غیرمستقیم به‌دست می‌آید. این پارامتر در قالب نقشه منحنی‌های ضریب هدایت هیدرولیکی برای استفاده در مدل آماده می‌شود و شامل ضریب هدایت هیدرولیکی در جهات سه‌گانه در آبخوان است.

- ضریب ذخیره یا ضریب آبدهی ویژه

از طریق تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش پمپاژ چاه‌های اکتشافی یا بهره‌برداری و یا از طریق روش‌های غیرمستقیم حاصل شده و به صورت نقشه منحنی‌های ضریب ذخیره برای استفاده مدل آماده می‌شود.

- ضریب قابلیت انتقال

چنان‌چه ضریب هدایت هیدرولیکی قبلا برای قسمت‌های مختلف آبخوان محاسبه نشده باشد، نسبت به تهیه نقشه ضریب قابلیت انتقال اقدام و سپس با توجه به ضخامت لایه آبدار در قسمت‌های مختلف آبخوان، نقشه ضریب هدایت هیدرولیکی تهیه می‌شود.

- ضریب نشت

این پارامتر نیز معمولا از طریق تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش پمپاژ چاه‌های اکتشافی با آرایش ویژه‌ای از پیزومترهای مجاور محاسبه می‌شود. برای استفاده از این پارامتر در مطالعات مدل نقشه منحنی‌های ضریب نشت برای آبخوان‌های نشتی تهیه می‌شود.

- تراز سطح زمین

شامل نقشه توپوگرافی سطح زمین می‌باشد که بر مبنای ارتفاع از سطح آب‌های آزاد تهیه می‌شود.

- تراز سنگ کف

شامل نقشه توپوگرافی سنگ کف آبخوان (آزاد و تحت فشار) است که بر مبنای ارتفاع از سطح آب‌های آزاد تهیه می‌شود.

- تراز سقف لایه تحت فشار

شامل نقشه توپوگرافی سطح زیرین لایه پوشاننده آبخوان‌های تحت فشار بوده و بر مبنای ارتفاع از سطح آب‌های آزاد تهیه می‌شود.

- تراز بستر رودخانه‌ها، کانال‌ها، حوضچه‌ها و . . .

این پارامتر به صورت مقطع طولی رودخانه، کانال، نقشه توپوگرافی بستر حوضچه و . . . بر مبنای ارتفاع از سطح آب‌های آزاد تهیه و مورد استفاده مدل قرار می‌گیرد.

- تراز سطح آب رودخانه‌ها،کانال‌ها، حوضچه‌ها و . . .

این پارامتر به صورت مقطع طولی سطح آب در بستر آبدار رودخانه،کانال، ارتفاع مطلق سطح آب حوضچه و . . . بر مبنای ارتفاع از سطح آب‌های آزاد تهیه و مورد استفاده مدل قرار می‌گیرد.

- حداکثر عمق تبخیر

این پارامتر به صورت نقشه زون‌بندی حداکثر عمق تبخیر از سطح آب زیرزمینی تهیه و برای استفاده در مدل آماده می‌شود.

- هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه‌ها،کانال‌ها،حوضچه ها و . . .

در این رابطه بستر رودخانه، کانال و . . . بر اساس میزان هدایت هیدرولیکی زون‌بندی می‌شود.

۲-۳- خطاهای آمار پایه منابع آب زیرزمینی در فرآیند جمع‌آوری،انتقال و ذخیره‌سازی

خطاهایی که در فرآیند جمع‌آوری، انتقال و ذخیره‌سازی داده‌ها و اطلاعات منابع آب زیرزمینی بروز می‌کنند در قالب‌های موضوعی مختلفی از قبیل خطاهای انسانی و غیرانسانی، خطاهای نرم افزاری و سخت افزاری، خطاهای سیستماتیک و غیرسیستماتیک، خطاهای طبیعی و غیرطبیعی، خطاهای مجرد و متداخل و . . . قابل طبقه‌بندی هستند که نیاز به فرصت کافی و بررسی‌های میدانی دارد. با وجود این ارائه لیست طبقه‌بندی نشده از خطاها، در این مرحله می‌تواند مبنای مناسبی برای اقدامات بعدی در این زمینه باشد. ریشه‌های این‌گونه خطاها را می‌توان بر اساس یک طبقه‌بندی ساده به صورت زیر ارائه نمود:

الف- خصوصیات و ویژگی‌های انسانی

- سطح اعتقاد و انگیزه عامل (آمارگر، تکنسین و کارشناس مسوول) جمع‌آوری، انتقال و ذخیره‌سازی
- سطح آگاهی عوامل جمع‌آوری و . . . از اهداف و اهمیت استفاده از آمار و اطلاعات
- سطح سواد و دانش عوامل جمع‌آوری و . . .
- حدود صحت و سلامتی جسمی و روانی عوامل جمع‌آوری و . . . . .

ب- لوازم اندازه‌گیری

- فرسوده بودن

- به‌هم خوردن واسنجی ابزار در حین استفاده
- به هم خوردن واسنجی ابزار در مرحله ساخت
- خرابی نامحسوس
- غیراستاندارد بودن کیفیت ساخت
- تاثیر شرایط آب و هوایی بر روی ابزار و لوازم اندازه‌گیری

ج- سازوکار ثبت و ذخیره‌سازی

- خطا در ورود داده‌ها
- جای‌گذاری اشتباه مدارک در پرونده های سنتی و فایل‌های کامپیوتری ایستگاه‌ها و منابع آب
- به‌هم‌ریختگی و به‌هم‌خوردگی پرونده‌ها حین جابه‌جایی مکانی و فایل‌های کامپیوتری حین انتقال و کپی
- اشتباه در ثبت دستی موقعیت و مشخصات فنی ایستگاه‌ها و منابع آب
- اشتباه در تایپ موقعیت و مشخصات فنی ایستگاه‌ها و منابع آب
- خطای سیستماتیک ناشی از استفاده از برنامه‌های کمکی تایپ داده‌ها

د- ساختمان و تجهیزات ایستگاه‌ها و نقاط اندازه‌گیری

- استفاده از مصالح نامناسب و غیراستاندارد در ساختمان چاه‌های اکتشافی، پیزومتر و مشاهده‌ای
- گرفتگی شبکه جدار چاه‌های مشاهده‌ای
- مسدود بودن لوله جدار چاه‌های مشاهده‌ای
- عدم تنظیم موتور چاه‌های بهره‌برداری در زمان آماربرداری
- عدم تنظیم موتور چاه‌های انتخابی در زمان اندازه‌گیری دوره‌ای آبدهی
- معیوب بودن پمپ چاه‌های بهره‌برداری در زمان آماربرداری
- معیوب بودن پمپ چاه‌های بهره‌برداری در زمان اندازه‌گیری دوره‌ای آبدهی
- غیرفنی بودن مقاطع اندازه‌گیری ثابت (دریچه، پارشال فلوم و . . .) در دهانه چشمه‌ها و قنات‌ها
- وجود ریزش و گرفتگی در بخش خشکه‌کار و ترکار قنات‌ها در زمان آماربرداری
- وجود ریزش و گرفتگی در بخش خشکه‌کار و ترکار قنات‌ها در زمان اندازه‌گیری دوره‌ای آبدهی

ه - محاسبه و پردازش

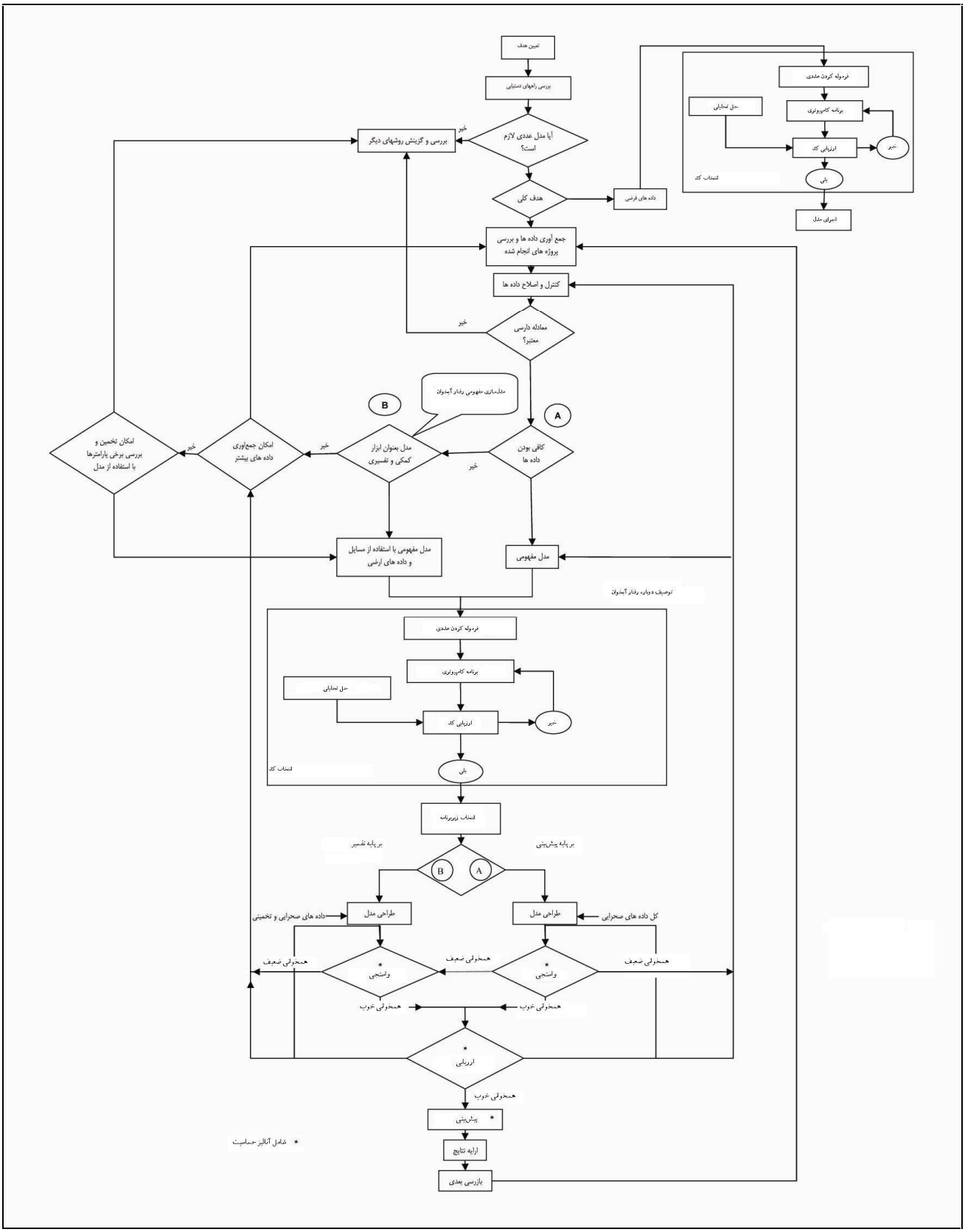
- خطا در فرآیند تحلیل نتایج عملیات ردیابی
- خطا در فرآیند تحلیل نتایج عملیات ژئوفیزیک و چاه‌پیمایی
- استفاده از روش‌های نامناسب در تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ

- خطا در فرآیند ترسیم نمودارها و نقشه‌های مختلف هیدروژئولوژی
- خطا در فرآیند محاسبات مربوط به آبنمود معرف (هیدروگراف معرف)
- خطا در فرآیند محاسبه تخلیه منابع آب زیرزمینی
- خطا در فرآیند محاسبه تراز سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای
- خطا در فرآیند تشخیص دانه‌بندی نمونه خاک چاه‌های اکتشافی، پیزومتر و مشاهده‌ای
- خطا در فرآیند محاسبه عوامل تغذیه و تخلیه کننده آبخوان
- خطا در تهیه مدل مفهومی ساختمان آبخوان‌ها به دلیل نقص و کمبود اطلاعات (از جمله زمین‌شناسی و...)
- خطای ناشی از اختلاط آبخوان‌های مطبق در تعیین مقادیر تغذیه و تخلیه‌کننده
- خطای ناشی از وجود آبخوان‌های مطبق در اندازه‌گیری سطح آب و فشار پیزومتریک
- خطای ناشی از وجود آبخوان‌های مطبق در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی
- ارائه اطلاعات اشتباه توسط پیمانکاران عملیات حفاری‌های اکتشافی، ژئوفیزیک، چاه‌پیمایی، ردیابی، آزمایش پمپاژ و . . .
- ارائه اطلاعات اشتباه توسط پرسش‌شوندگان در حین آماربرداری
- عدم توجه کامل به دستورالعمل‌های فنی در مورد مطالعات دفتری، صحرایی و عملیات اکتشافی
- و سایر

۲-٤- پروتکل مدل‌سازی[1]

پروتکل مدل‌سازی شامل تمام مراحل تهیه یک مدل یعنی تعریف هدف مراحل انتخاب کد کامپیوتری صحت‌سنجی طراحی مدل، واسنجی مدل، تحلیل حساسیت و پیش‌بینی می‌باشد. در مورد مراحل مختلف مدل‌سازی و نحوه ارائه الگوریتم مدل‌سازی بین محققین اختلاف نظرهایی وجود دارد. اهمیت انتخاب یک پروتکل مناسب در درجه اول به دلیل نقش آن در سرعت دادن به پیشرفت مراحل مدل‌سازی می‌باشد. الگوریتم‌های متعددی تاکنون توسط محققین ارائه شده است که با مروری بر منابع قابل دسترس می‌توان نتیجه گرفت الگوریتم‌های ارائه شده هر کدام دارای نقاط ضعف و قوتی می‌باشند. با توجه به وضعیت آماری دشت‌های کشور که حتی در مورد دشت‌های نمونه نیز اطلاعات دقیق و درستی در دسترس نمی‌باشد. اطلاعات موجود در خصوص دشت‌های کشور نیز چندان قابل اعتماد نبوده و با روش‌های مختلف باید مورد کنترل و اصلاح قرار گیرند، لذا استفاده از یک الگوریتم مدل‌سازی که با شرایط موجود هماهنگی داشته باشد، ضروری به نظر می‌رسد. نکاتی را که در مورد الگوریتم باید مدنظر داشت این است که دست‌یابی به آمار و اطلاعات قابل استفاده در یک مقطع زمانی کوتاه و خاص امکان‌پذیر نبوده و در طی پروژه باید در مقاطع زمانی مختلف نظارت‌هایی صورت گیرد و حتی در صورت نیاز بازدیدهای صحرایی و اصلاح مشخصات منابع انجام شود، زیرا وجود خطا در مدل مفهومی به علت وجود خطا یا اشتباه در آمار یا اطلاعات موجود قبلی، دور از ذهن نیست. با توجه به مطالب فوق در نمودار ۲-۲ الگوریتم مطالعات و مراحل مدل‌سازی ارائه شده است، امید است که مفید واقع شود.

1-Modeling protocol



نمودار ۲-۲- پروتکل مدل‌سازی [٤]

۲-۵- انواع مدل‌های جریان آب زیرزمینی

یک سامانه آب زیرزمینی متشکل از مجموعه‌ای از فرآیندها و پدیده‌های فیزیکی است که بیان کمی و کیفی فرآیندها و شناخت رفتار سامانه از طریق معادلات حاکم و مدل‌ها صورت می‌گیرد. در شناخت رفتار سامانه‌های آب زیرزمینی تاکنون از انواع مختلف مدل‌ها از قبیل مدل‌های فیزیکی و مدل‌های ریاضی استفاده شده است (نمودار ۲-۳).

۲-۵-۱- مدل‌های فیزیکی[1]

از عمومی‌ترین مدل‌های فیزیکی می‌توان به مدل‌های محیط متخلخل[2] اشاره نمود که یکی از مدل‌های مذکور مدل مخزن ماسه‌ای متشکل از مخزن محتوی ماسه با دانه بندی مشخص می‌باشد که بسته به همگنی یا غیرهمگنی محیط داخل مخزن به صورت همگن یا با لایه بندی ساخته می‌شود. شکل مخزن نیز بستگی به شکل هندسی و شرایط محیط دارد. در شبیه‌سازی حرکت آب در اطراف یک چاه پمپاژ شکل مخزن ماسه‌ای به صورت استوانه‌ای و در شبیه‌سازی ارتباط رودخانه با آبخوان مجاور شکل آن به صورت مستطیلی انتخاب می‌شود. گاهی برای ردیابی دقیق‌تر حرکت آب در داخل مخزن از ذرات شیشه به جای ماسه استفاده می‌شود که به نام مدل شفاف[3] شناخته شده‌اند. [۱۹]

۲-۵-۲- مدل‌های تشابهی

مدل‌های تشابهی بر اساس تشابه و تطابق جز به جز اجزای معادلات حاکم بر سامانه آب‌های زیرزمینی و سامانه موردنظر استوار می‌باشد. به عبارت دیگر این مدل‌ها بر اساس شباهت معادله حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل با معادله حاکم بر انتشار حرارت جریان الکتریسیته و دیگر قوانین فیزیک و بر اساس رابطه بین ورودی و خروجی و رابطه بین علت و معلول شبیه‌سازی می‌شود. مدل‌های تشابهی که تاکنون برای مطالعه مسایل آب‌های زیرزمینی استفاده شده‌اند عمدتا در سه گروه اصلی مدل‌های سیال گرانرو[4] مدل‌های تشابهی الکتریکی[5] و مدل‌های با روش‌های گوناگون قرار می‌گیرند.

1-Physical models
2-Porous media models
3-Transparent model
4-Viscous fluid models
5-Electrical analog models

نمودار ۲-۳- انواع مدل‌ها در آب های زیرزمینی [۳]

الف- مدل‌های سیال گرانرو

اساس مدل‌های سیال گرانرو بر این پدیده استوار است که جریان ورقه‌ای[1] ماندگار و دوبعدی یک سیال گرانرو بین دو صفحه‌ای که فاصله بسیار کمی از یکدیگر دارند از معادله لاپلاس ($\nabla^2 h=0$) تبعیت می‌نماید. سرعت متوسط جریان یک سیال گرانرو بین دو صفحه افقی نزدیک به یک‌دیگر از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$V_k = -\frac{b^2 \gamma \partial h}{12\mu \partial x} \qquad (۱-۲)$$

$$V_y = -\frac{b^2 \gamma \partial h}{12\mu \partial y} \qquad (۲-۲)$$

که b فاصله بین دو صفحه γ وزن مخصوص سیال μ گرانروی h پتانسیل سیال V_x سرعت سیال در جهت x و V_y سرعت سیال در جهت y می‌باشد. وجه تشابه بین روابط بالا قانون دارسی $\bar{V} = -k\frac{\partial h}{\partial x}$ می‌باشد. هدایت هیدرولیکی کانال بین صفحات که در روابط بالا آورده شده است به صورت $k = \frac{b^2\gamma}{12\mu}$ می‌باشد.

مدل سیال گرانرو عموما بسته به وضعیت پدیده مورد مطالعه و هدف مطالعه در دو وضعیت عمودی یا افقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین بسته به شیب سامانه مورد مطالعه، مدل ممکن است در هر زاویه‌ای نسبت به افق قرار گیرد (مانند جریان آب زیرزمینی در یک لایه شیب‌دار). کاربرد مدل‌های عمودی در مطالعات تغذیه آب‌های زیرزمینی نفوذ آب از رودخانه‌ها نشت از سدهای خاکی و پدیده‌های مانند آن و کاربرد مدل‌های افقی در مطالعات اثرات منطقه‌ای پمپاژ، تبخیر و تعرق و جریان در آبخوان‌های چند لایه‌ای می‌باشد.

به‌طورکلی در طراحی یک مدل سیال گرانرو افقی یا عمودی نیاز به انتخاب فاکتورهای مقیاس[2] می‌باشد تا پارامترها و متغیرهای مدل به مقیاس واقعی سامانه مورد مطالعه تبدیل شود [۱۹].

ب- مدل‌های تشابهی الکتریکی

مدل‌های تشابهی الکتریکی در دو سامانه پیوسته و گسسته تهیه می‌شوند. تفاوت این دو نوع مدل در چگونگی پارامترهای مکانی و ارتباط آنها با یکدیگر است. در سامانه‌های پیوسته، خواص لایه آبدار پیوسته به وسیله یک مایع رسانای الکتریکی یا جامد رسانا که پیوستگی مکانی دارد مدل می‌شود. در سامانه‌های گسسته خواص پیوسته لایه آبدار به وسیله مجموعه‌ای از المان‌های الکتریکی در یک شبکه مدل می‌شود. در مدل جامد رسانا معمولا از کاغذهای آغشته به گرافیت (رسانا) به نام Teledeltos استفاده می‌شود ولی در مدل مایع رسانا، معمولا از یک مایع تقریبا نیمه هادی مثل سولفات مس استفاده می‌شـــود. [۳].

۲-۵-۳- مدل‌ها با روش‌های مختلف

این مدل‌ها شامل سایر روش‌های شبیه‌سازی هستند که می‌توانند برای مطالعه مسایل آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند. این روش‌ها عبارتند از [۱۹]:

1- laminar flow
2- scale factor

- مدل غشایی گسترده[۱]
- مدل الگویی موبر[۲]
- مدل کاغذ خشک‌کن[۳]
- مدل‌های کامپیوتری ترکیبی[۴]

۲-۵-٤- مدل‌های ریاضی

همان‌طور که پیش‌تر در تعریف مدل ریاضی بیان شد، یک مدل ریاضی شامل مجموعه‌ای از عبارات ریاضی و جملات منطقی می‌باشد که با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا بتوان از طریق آن رفتار سامانه موردنظر را شبیه‌سازی نمود. این مدل‌ها از دیدگاه‌های مختلف طبق موارد ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند [۳].

۲-۵-۵- بر اساس رابطه علت و معلول

- مدل‌های معین[۵]
- مدل‌های تصادفی[۶]

در مدل‌های معین متغیرها از یک قاعده مشخص یا از یک رابطه شناخته شده فیزیکی پیروی می‌کنند و در واقع رابطه بین علت و معلول کاملا مشخص می‌باشد و هیچ‌گونه متغیر تصادفی در مدل وجود ندارد. بنابراین مدل مذکور برای دو سری داده مساوی یا مشابه همواره نتایج مساوی و یا مشابه خواهند داد.

در مدل‌های تصادفی مولفه‌های تصادفی وجود دارد و در واقع رابطه بین علت و معلول کاملا از یک رابطه فیزیکی تبعیت ننموده و کاملا مشخص نمی‌باشد. بنابراین متغیرها دارای توزیع احتمالاتی بوده و از قانون خاصی پیروی نمی‌کنند.

۲-۵-٦- بر اساس نوع فرآیند

- مدل‌های تجربی[۷]
- مدل‌های مفهومی[۸]
- مدل‌های کاملا فیزیکی[۹]

1-Stretched membrane model
2- Moire pattern model
3- Blotting paper model
4- Hybrid computer models
5- Deterministic or chance independent models
6- Stochastic or chance dependent models
7- Empirical or black box models
8- Conceptual or gray box models
9- Fully physical based or white box models

مدل‌های تجربی بر اساس رابطه مشخص بین ورودی و خروجی سامانه استوار بوده و فرایندهای فیزیکی داخلی سامانه در آنها مورد توجه قرار نمی‌گیرد. در واقع مدل بر اساس تجزیه و تحلیل تبدیل ورودی و خروجی در سری‌های زمانی بیان می‌شود (مانند هیدروگراف واحد).

مدل‌های مفهومی بر اساس در نظر گرفتن بعضی از فرآیندهای فیزیکی حوضه بیان می‌شود، یعنی روابطی که در مدل به کار رفته آن‌قدر فیزیکی نیستند که تمام فرآیندهای فیزیکی سامانه را مدنظر قرار دهند این مدل هم بر اساس تجربه و هم با در نظر گرفتن فرآیندهای فیزیکی حوضه می‌باشد.

در مدل‌های کاملا فیزیکی هر فرآیندی که در سامانه رخ می‌دهد بر اساس یک پدیده فیزیکی تعریف می‌شود. تمام پارامترهای مدل مفهوم فیزیکی داشته و قابل اندازه‌گیری می‌باشند.

۲-۵-۷- بر اساس ابعاد مکانی[۱]

- مدل‌های دوبعدی سطحی[۲]
- مدل‌های دوبعدی نیمرخ یا قائم[۳]
- مدل‌های شبه سه‌بعدی[۴]
- مدل‌های سه‌بعدی کامل[۵]

مدل‌های دوبعدی سطحی به چهار گروه آبخوان تحت فشار یا محبوس[۶]، آبخوان تحت فشار نشتی[۷]، آبخوان آزاد[۸] و آبخوان ترکیبی[۹] تقسیم می‌شوند.

۲-۵-۸- بر اساس وضعیت تخلخل محیط جریان

- مدل‌ها با تخلخل یگانه[۱۰]
- مدل‌ها با تخلخل دوگانه[۱۱]
- مدل‌ها با درز و شکاف[۱۲]
- مدل‌ها با تخلخل شبکه‌ای

1- Spatial dimension
2- Two dimensional areal models
3- Two dimensional profile models
4- Quasi three dimensional models
5- Three dimensional models
6- Confined aquifer
7-Leaky confined aquifer
8-Unconfined aquifer
9-Mixed aquifer
10- Mixed aquifer
11-Double porosity or continum models
12- Discrete fracture models

۲-۵-۹- بر اساس نوع روش حل معادلات

- مدل‌های تحلیلی
- مدل‌های عددی

حل مدل‌های عددی به دو روش‌مستقیم و غیرمستقیم صورت می‌گیرد.

در روش‌های غیرمستقیم (تکراری) متداول محدوده مورد مطالعه به تعدادی سلول یا اجزای محاسباتی تقسیم می‌شود و معادله حاکم بر پدیده موردنظر به وسیله روابط تقریبی بر روی سلول‌ها جانشین می‌شود که این معادلات هم در داخل حوضه و هم در شرایط مرزی صادق می‌باشند. در روش اجزای مرزی که به نام‌های روش معادله انتگرال روش انتگرال مرزی نیز مطرح می‌باشد، سطوح خارجی یا مرزهای حوضه به تعدادی اجزا تقسیم می‌شود و تغییرات کمیت فیزیکی موردنظر (به عنوان مثال بار هیدرولیکی h) در روی این اجزا تعیین می‌شود. اساس این روش بر استفاده از یک تابع تقریبی می‌باشد که در معادلات حاکم بر میدان مورد مطالعه صادق باشد ولی در روابط شرایط مرزی صدق نکند. در این صورت معادلات حاکم در داخل حوضه صفر خواهد شد و فقط حل معادلات شرایط مرزی باقی خواهد ماند. تاکنون روش‌های غیرمستقیم متعددی توسط محققین در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی مطرح شده است که برخی از آنها عبارتند از:

- روش تفاضل‌های محدود
- روش تفاضل محدود جامع
- روش انتگرال مرزی
- روش اجزای تحلیلی
- روش اجزای محدود

در مجموعه روش‌های اجزای محدود نیز روش‌های مختلفی تاکنون مطرح شده است که از رایج‌ترین آنها، روش‌های باقیمانده وزنی می‌باشد. روش‌های collocation Galerkin و least-square جزو این روش‌ها محسوب می‌شوند.

روش‌های مستقیم متعددی برای حل دستگاه معادلات خطی وجود دارد. معمولا حل عددی معادله حاکم بر حرکت آب‌های زیرزمینی با کاربرد روش‌های متداول عددی منجر به حل یک دستگاه معادلات خطی شامل N معادله و N مجهول می‌شود. کاربرد روش‌های عددی مستقیم عملا زمانی امکان‌پذیر می‌باشد که تعداد معادلات (N) زیاد نباشد، زیرا با افزایش تعداد معادلات:

الف ـ میزان حافظه مورد نیاز کامپیوتر به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که این افزایش متناسب با N^2 می‌باشد.

ب ـ حجم محاسبات نیز متناسب با N^3 افزایش می‌یابد.

افزایش حجم محاسبات نخست باعث افزایش حافظه مورد نیاز کامپیوتر می‌شود. دوم این‌که باعث افزایش خطاهای محاسباتی ناشی از گرد شدن اعداد می‌شود. این مساله به ویژه در بررسی جریان‌های ناماندگار دارای اهمیت می‌باشد، زیرا در این روش بار هیدرولیکی محاسبه شده در هر گام زمانی به عنوان شرایط اولیه برای گام زمانی بعدی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه جمع شدن اشتباهات سیستماتیک به سرعت با تعداد معادلات و تعداد فاصله‌های زمانی افزایش می‌یابد و منجر به جواب‌های نادرست می‌شود.

معمولا در مسایل آب‌های زیرزمینی به علت ناهمسانی و ناهمگنی و وسعت حوضه مورد مطالعه لزوما حوضه به اجزای کوچک‌تر تقسیم می‌شود. این امر باعث ایجاد یک دستگاه معادلات خطی بزرگ می‌شود که باید مدل برای یک دوره زمانی نسبتا طولانی با گام‌های زمانی کوتاه و متعدد طراحی می‌شود. در نتیجه تعداد معادلات خطی به حدی زیاد می‌شود که عملا استفاده از روش‌های

مستقیم امکان‌ناپذیر می‌شود و به ناچار باوجود مزایای این روش‌ها، روش‌های غیرمستقیم ترجیح داده می‌شوند. یکی از عمومی‌ترین روش‌های مستقیم در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، روش حذف گوس[1] می‌باشد.

۲-۵-۱۰- بر اساس هدف مدل‌سازی

- مدل‌های شناسایی
- مدل‌های پیش‌بینی
- مدل‌های مدیریتی

مدل‌های شناسایی عموما برای تجزیه و تحلیل و تخمین مقادیر پارامترها و تعریف شرایط مرزی استفاده می‌شوند. چنین تجزیه و تحلیل‌هایی در مواردی که اطلاعات اندک و یا غیرمطمئن باشند، مناسب هستند.

مدل‌های پیش‌بینی به منظور بررسی پاسخ سامانه آب زیرزمینی نسبت به تغییرات بار هیدرولیکی، تنش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی و غلظت آلاینده‌ها به کار گرفته می‌شوند. مسایل سامانه جریان آب زیرزمینی که با کمک چنین مدل‌هایی تجزیه و تحلیل می‌شود شامل موارد زیر می‌باشد:

- افت درازمدت در مجاورت یک چاه پمپاژ
- افت درازمدت ناحیه‌ای در آبخوان
- افت کوتاه مدت در نزدیکی چاه پمپاژ
- افت کوتاه مدت در آبخوان
- تاثیر متقابل آبخوان و قنات
- مقدار تاثیر چاه پمپاژ
- کاهش یا افزایش در جریان آب سطحی و تراز آب‌های سطحی
- تغییرات تراز آب زیرزمینی ناشی از بهره برداری منابع آب سطحی
- پیش‌روی تدریجی آب شور دریا ناشی از بهره برداری از آب‌های زیرزمینی آبخوان‌های ساحلی
- نشست در سدها زهکش‌ها
- تغییرات تراز آب زیرزمینی ناشی از تغذیه مصنوعی

مدل‌های مدیریتی که ترکیبی از شبیه‌سازی عددی می‌باشند اخیرا توسعه یافته اند و شامل مراحل برنامه‌ریزی، اجرا و تدابیر کنترلی مربوط به اکتشاف، توسعه و استخراج منابع آب می‌باشد.

1- Gauss elimination methods

۲-٦- مدل مفهومی

معمولا پس از تعیین اهداف مدل‌سازی دومین گام در فرآیند مدل‌سازی و در حقیقت مهم‌ترین مرحله در مطالعات مدل تهیه یک مدل مفهومی می‌باشد. مدل مفهومی یک تصویر ساده شده از دنیای واقعی است. این مدل خلاصه‌ای از ویژگی‌های سامانه هیدروژئولوژیکی است که ضمن برخورداری از دقت لازم معمولا به صورت توصیفی و گرافیکی (نیمرخ زمین‌شناسی هیـــدروژئولوژی و یا نمودار بلوکی) ارائه دهنده ویژگی‌های اصلی سامانه می‌باشد (شکل ۲-۱). مدل مفهومی، پایه مدل ریاضی است و خود بر پایه اطلاعات اولیه داده‌های صحرایی و تعبیر و تفسیرهای هیدروژئولوژیکی استوار می‌باشد.

۲-٦-۱- اهداف تهیه مدل مفهومی

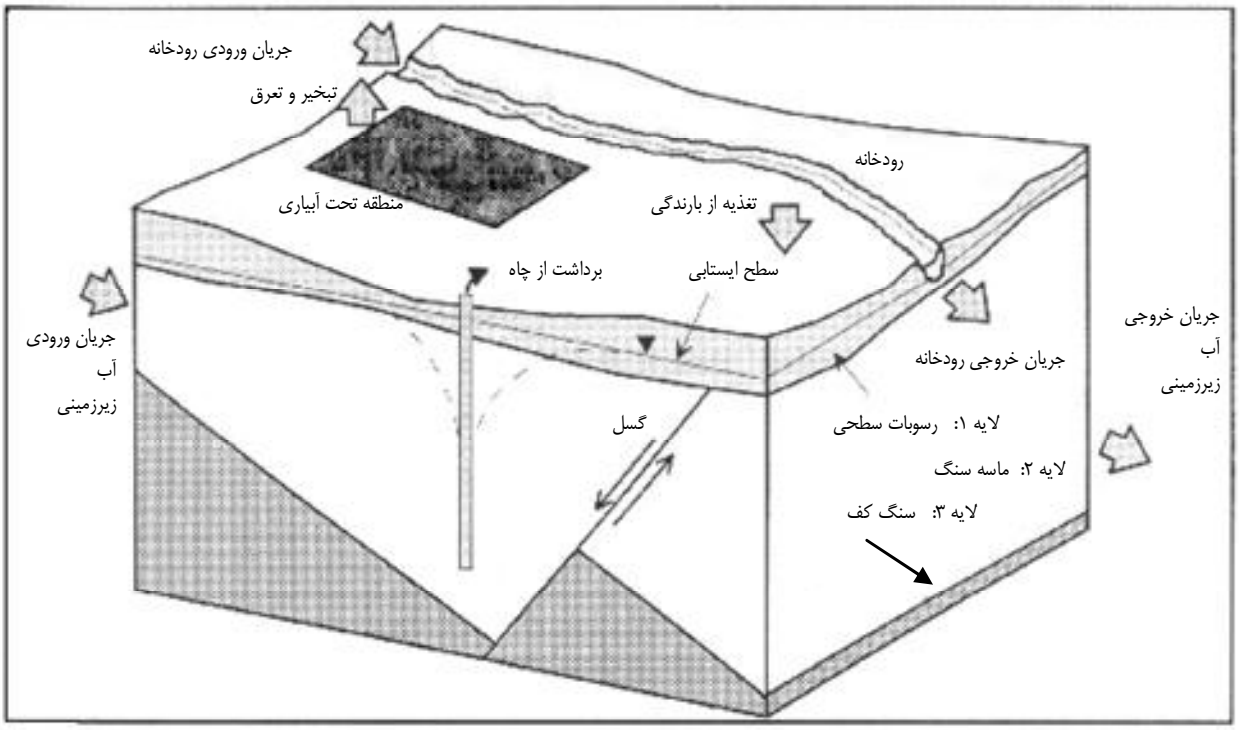
از مهم‌ترین هدف‌های تهیه مدل مفهومی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- دست‌یابی به دانش صحیح از وضعیت هیدروژئولوژیک منطقه
- تشریح مساله آب زیرزمینی برای تهیه یک مدل عددی
- کمک در انتخاب یک مدل عددی مناسب
- ساده‌سازی منطقی مساله به کمک فرضیات مناسب

با توجه به این که در شبیه‌سازی و بازسازی کامل، سامانه واقعی امکان‌پذیر نمی‌باشد و همچنین معمولا هیچ وقت داده‌های کاملی برای توصیف دقیق یک سامانه وجود ندارد، ناگزیر باید در مدل مفهومی فرضیات ساده کننده‌ای را اعمال نمود. مدل مفهومی باید به گونه‌ای تهیه شود که ضمن ساده بودن، رفتار سامانه را به خوبی شبیه‌سازی کند. ساده‌سازی بیش از حد ممکن است منجربه تهیه مدلی شود که اطلاعات مورد نظر را در برنداشته باشد. از سوی دیگر ساده‌سازی کم‌تر از حد ممکن است منجربه اعمال هزینه‌های زیاد شده یا سبب شود در مراحل تخمین پارامتر[1] یا واسنجی داده‌های کافی در دسترس نباشند. یکی از عواملی که باعث می‌شود در پیش‌بینی‌های مدل دقت لازم وجود نداشته باشد، اشتباهات و نواقص موجود در مدل مفهومی‌است.

تهیه یک مدل مفهومی‌مناسب لزوما کاری نیست که در مرحله نخست مطالعات صورت پذیرد. مدل‌سازی فرآیندی پیوسته و پویا است که در آن به تناسب ادامه مطالعات و افزایش دانش نسبت به سامانه و افزوده شدن بر حجم داده‌های موجود، مدل مفهومی نیز تکامل یافته و فرضیات تشکیل‌دهنده آن دوباره مورد بررسی قرار می‌گیرد و به آنها افزوده یا کاسته شده و یا اصلاح می‌شود.

1-Parameter estimation



شکل ۲-۱- مثالی از یک مدل مفهومی‌به شکل نمودار بلوکی [۲۰]

۲-۶-۲- مراحل مختلف تهیه مدل مفهومی

الف- تعریف مرزهای سامانه

نخستین گام در تهیه مدل مفهومی، مشخص کردن محدوده منطقه مورد مطالعه است. این کار به معنی تعیین مرزهای مدل می‌باشد. مدل‌های عددی نیاز به شرایط مرزی دارند به گونه‌ای که بار هیدرولیکی یا بده یا ترکیبی از آنها در طول مرزهای سامانه مشخص باشد. معمولا مرزهای هیدروژئولوژیک طبیعی سامانه باید به عنوان مرزهای مدل در نظر گرفته شوند. با این وجود گاه نیاز به محدودتر کردن منطقه در درون مرزهای هیدروژئولوژیکی می‌باشد. به هرحال در تهیه مدل مفهومی مرزهای واقعی هیدروژئولوژیکی باید مشخص شده باشند.

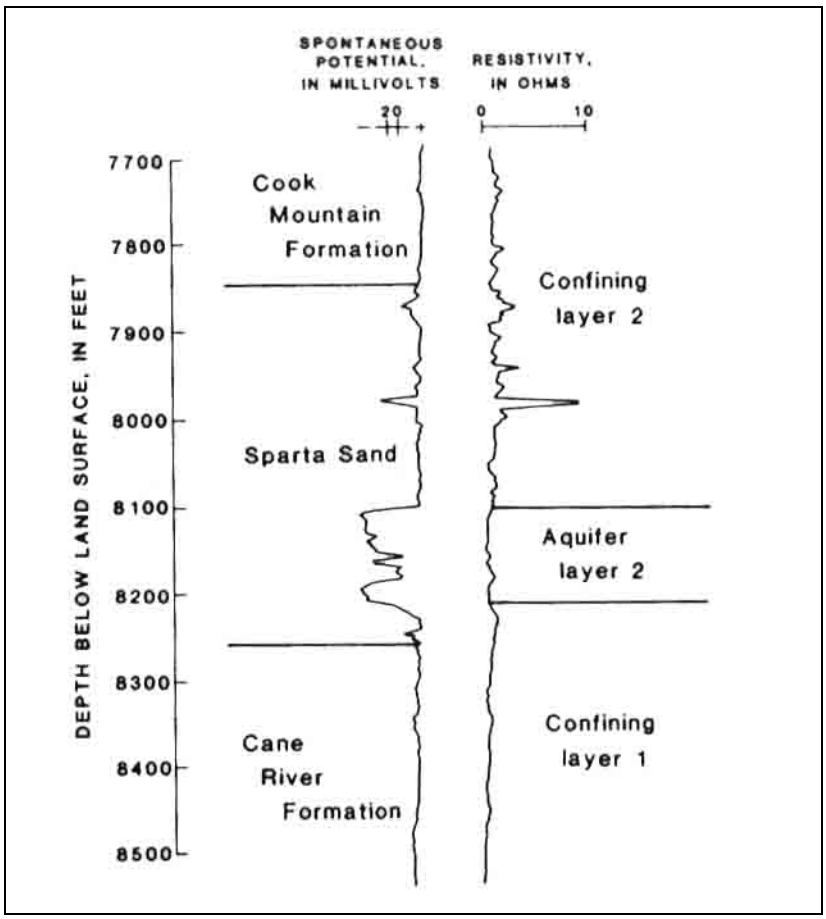
ب - تعیین واحدهای آب - چینه‌ای[1]

برای مشخص کردن واحدهای آب-چینه‌ای از ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی (شامل نقشه‌ها و نیمرخ‌های زمین‌شناسی و نمودار چاه‌ها و گمانه‌ها) با اطلاعات مربوط به ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی سازندها استفاده می‌شود. به بیان ساده واحدهای آب ـ چینه‌ای سازندهای زمین‌شناسی با ویژگی‌های هیدروژئولوژیک یکسان می‌باشند. گاه ممکن است چند سازند زمین‌شناسی تشکیل یک واحد آب - چینه‌ای را تشکیل دهند و یا یک سازند زمین‌شناسی دربردارنده چند واحد آب چینه‌ای باشد.

1- Hydrostratigraphic units

در مواردی که توالی‌های ضخیمی‌از سازندهای ماسه‌ای در منطقه وجود داشته باشد باید از روش‌های ویژه‌ای برای تشخیص و تفکیک واحدهای آب – چینه‌ای استفاده نمود. در چنین مواردی شاید استفاده از مرزهای چینه‌ای مناسب نباشد. (نمودار ۲-۴) تقسیم‌بندی لایه‌های رسوبی مختلف بر اساس چینه‌شناسی آنها همخوانی مناسبی با نمودار الکتریکی لایه‌ها ندارد. بدین ترتیب برای تشخیص واحدهای آب ـ چینه‌ای ممکن است از مرزهای چینه‌ای صرف نظر کرده و مستقیما از اطلاعات به‌دست آمده از نمودار الکتریکی استفاده شود. برای تشخیص لایه‌های مدل همچنین می‌توان از داده‌های مربوط به بارهای هیدرولیکی ناحیه‌ای به منظور تشخیص واحدهای با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی یکسان استفاده نمود. برای مثال نمودار فراوانی تراز سطح آب در گمانه‌های مختلف در سطح منطقه می‌تواند به خوبی در تفکیک گروه‌های مختلف بار هیدرولیکی که نشان دهنده واحدهای آب ـ چینه‌ای مختلف باشند، کمک کند.

سنگ کف آبخوان ازجمله واحدهای آب – چینه‌ای مهم می‌باشد که تشخیص شکل هندسی و موقعیت آن با توجه به اطلاعات پایه در تهیه مدل مفهومی‌صورت می‌گیرد.



نمودار ۲-٤- استفاده از نمودار ژئوفیزیکی (log) الکتریکی برای تفکیک واحدهای آب-چینه‌ای[٥]

ج - تهیه بیلان آب

از دیگر اجزای تشکیل‌دهنده یک مدل مفهومی، آب‌های ورودی به سامانه، جهت های جریان و نقاط خروجی آن می‌باشد (شکل ۳-۱). جریان‌های ورودی شامل تغذیه آب زیرزمینی از بارندگی، رواناب و دیگر منابع آب سطحی می‌باشد. جریان خروجی شامل چشمه‌ها تغذیه جریان‌های سطحی، تبخیر و تعرق و پمپاژ می‌باشد. جریان‌های زیرزمینی می‌توانند هم به صورت ورودی و هم به صورت خروجی از سامانه آب زیرزمینی باشند. به منظور نشان دادن اهمیت هر یک از این مولفه‌ها که منجر به تغییر در ذخیره سامانه می‌شوند، تهیه یک بیلان آبی بر پایه داده‌های به‌دست آمده از مطالعات صحرایی ضروری است. در فرآیند واسنجی مدل، این بیلان محاسبه شده با بیلان شبیه‌سازی شده به وسیله مدل مقایسه خواهد شد.

د - تعیین سامانه جریان

تعیین واحدهای آب - چینه‌ای چارچوب مدل مفهومی را تشکیل می‌دهد. اطلاعات هیدرولوژیکی برای پی بردن به چگونگی حرکت آب زیرزمینی در درون سامانه به کار می‌آید که شامل اطلاعات مربوط به بارندگی، تبخیر، رواناب سطحی و همچنین داده‌های بارهای هیدرولیکی و اطلاعات هیدروشیمی می‌باشد. اندازه‌گیری‌های سطح آب به منظور تعیین جهت عمومی‌جریان آب زیرزمینی موقعیت مناطق تغذیه و تخلیه و ارتباط بین آبخوان‌ها و منابع آب‌های سطحی صورت می‌گیرد. تشخیص سامانه جریان ممکن است به تنهایی بر پایه داده‌های هیدرولوژیکی فیزیکی صورت پذیرد. اما بهتر است برای تقویت مدل مفهومی در صورت امکان از دانسته‌های ردیابی و هیدروشیمی نیز استفاده شود. از این گونه داده‌ها می‌توان در تشخیص جهت جریان آب، تعیین منشا میزان تغذیه و تخمین بده جریان آب زیرزمینی استفاده نمود.

اندازه‌گیری‌های شیمیایی و فیزیکی معمولا شامل غلظت آنیون‌ها، کاتیون‌های اصلی (سولفات بی‌کربنات کلر سدیم کلسیم و منیزیوم) دمای آب و PH می‌باشد که بسته به نوع مطالعه می‌توان از آنالیزهای عناصر نادر، ایزوتوپ‌های پایدار، ناپایدار و نیز ترکیبات آلی نیز استفاده نمود.

۲-۷- روش‌های حل عددی معادلات و روش برنامه‌ریزی پویا در مدل‌های ریاضی

در حالت کلی تمام روش‌های عددی که در حل مسایل جریان آب زیرزمینی به کار گرفته شده‌اند، شامل جایگزینی معادله دیفرانسیل مورد نیاز توسط یک معادله جبری یا یک سامانه معادلات جبری می‌باشند. معمولا این روش‌ها سامانه‌ای از معادلات خطی را جایگزین معادله دیفرانسیل مورد نظر می‌نمایند. در حل نهایی باید سامانه معادلات حل شود. معمول‌ترین روش‌های عددی که تاکنون در حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان آب زیرزمینی تاکنون به کار رفته‌اند عبارتند از:

- روش تفاضل‌های محدود
- روش اجزای محدود
- روش اجزای محدود جامع
- روش انتگرال مرزی
- روش اجزای تحلیلی

که دو روش تفاضل محدود و اجزای محدود نسبت به دیگر روش‌ها معمول‌تر می‌باشند. بنابراین در ادامه بحث با صرف نظر از تئوری و اثبات روش‌ها مروری بر روش‌های تفاضل محدود و اجزای محدود صورت خواهد گرفت.

۲-۷-۱- روش تفاضل‌های محدود

روش تفاضل محدود تقریبا قدیمی‌ترین روش حل عددی معادلات می‌باشد. تئوری این روش کاملا شناخته شده است و کاربرد عملی آنها با توسعه قابلیت رایانه‌ها بیش‌تر شده است. اصول ریاضی روش مذکور بر اساس جایگزینی متفاوت جزیی معادلات دیفرانسیل به وسیله سامانه‌ای از معادلات جبری می‌باشد. به گونه‌ای که قابل حل توسط رایانه باشد.

اساس این روش مبتنی بر تجزیه حوضه به اجزای کوچک‌تر و همچنین تقسیم زمان به فواصل زمانی کوتاه Δt (در جریان غیرماندگار) و جانشین نمودن معادله دیفرانسیل جزیی حاکم به وسیله دستگاه معادلات خطی می‌باشد که ماتریس آن برای جریان‌های ماندگار و غیرماندگار به شرح زیر می‌باشد:

در جریان ماندگار دستگاه معادلات خطی به صورت $A.H = B$ می‌باشد. با معلوم بودن مقدار قابلیت انتقال (T) در گره‌های شبکه عناصر ماتریس A به‌دست می‌آید. با معلوم بودن شرایط مرزی و مقدار تغذیه یا تخلیه در گره‌ها مقدار ماتریس ستونی B نیز مشخص می‌شود. بنابراین با معلوم بودن عناصر ماتریس A و ماتریس ستونی B مقدار عناصر ماتریس ستونی H که مقادیر بار هیدرولیکی (h) در گره‌های مختلف شبکه می‌باشد به‌دست می‌آید.

- در جریان غیرماندگار دستگاه معادلات خطی به صورت $\overline{A}.H^{(t_0+k\Delta t)} = B^{(t_0+(k-1)\Delta t)}$ می‌باشد که با معلوم بودن مقدار ضرایب هیدرودینامیک (S,T) در گره‌های شبکه عناصر ماتریس A به‌دست می‌آید. با معلوم بودن شرایط اولیه شرایط مرزی و میزان تخلیه یا تغذیه در هر گام زمانی(Δt)، مقدار ماتریس ستونی B مشخص می‌شود. بنابراین با معلوم بودن عناصر ماتریس A و ماتریس ستونی B مقدار عناصر ماتریس ستونی H در هر گام زمانی k به دست می‌آید.

دستگاه معادلات خطی فوق از طریق روش‌های مستقیم متداول از قبیل روش گوس[1]- جوردن[2] و روش‌های غیرمستقیم (تکراری) حل می‌شود. اساس روش‌های غیرمستقیم مبتنی بر تجزیه ماتریس A به دو ماتریس C و D به صورت $A = C - D$ می‌باشد به طوری که ماتریس معکوس C^{-1} وجود داشته باشد.

به این ترتیب که دستگاه معادلات $A.H = B$ را می‌توان به صورت رابطه (۲-۳) نوشت:

$$C.H = D.H + B \qquad (۳-۲)$$

و تکرار محاسبات طبق رابطه (۲-۴) می‌باشد.

$$C.H_m = D.H_{m-1} + B \qquad (۴-۲)$$

که در این رابطه m شماره تکرار محاسبات را مشخص می‌نماید. عمل تکرار محاسبات آن‌قدر ادامه می‌یابد تا جواب‌های به‌دست آمده $H_1\ H_2\ \ldots\ H_m$ به اندازه کافی به جواب‌های درست نزدیک باشد یا اختلاف آنها در حد قابل قبول باشد.

1- Gauss
2- Jordan

با توجه به نمودار ۲-۵، تغییرات تابع h حول نقطه X_0 و در جهت مثبت به وسیله سری تیلور به وسیله رابطه (۲-۵) بیان می‌شود (با فرض که تغییرات تابع h تنها در امتداد x صورت گیرد و در جهات z y و همچنین t ثابت باشد).

$$h(x_0+\Delta x,y,z,t)=h(x_0,y,z,t)+\Delta x\frac{\partial h}{\partial x}(s,y,z,t)+\frac{(\Delta x)^2}{2!}\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}(x_o,y,z,t)+\ldots+O(\Delta x)^n \qquad (۵-۲)$$

که ادامه سری تیلور در $O(\Delta x)^n$ تحت عنوان خطای گرد کردن[1] خلاصه شده است.

مشابه رابطه ۲-۱ تغییرات تابع h حول نقطه x_o و در جهت منفی به وسیله سری تیلور توسط رابطه ۲-۶ بیان می‌شود.

$$h(x_0-\Delta x,y,z,t)=h(x_0,y,z,t)-\Delta x\frac{\partial h}{\partial x}(s,y,z,t)+\frac{(\Delta x)^2}{2!}\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}(x_o,y,z,t)+\ldots+O(\Delta x)^n \qquad (۶-۲)$$

حال با حل روابط (۲-۵) و (۲-۶) مقدار تغییرات تابع h حول نقطه x_o (مشتق تابع h) به سه روش مختلف تخمین زده می‌شود:

- تخمین اختلاف مرکزی

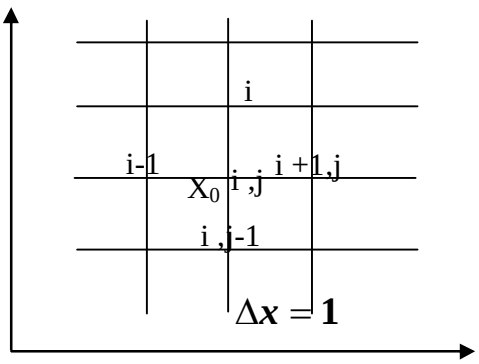
$$\frac{\partial h}{\partial x}\cong\frac{h(x_o+\Delta x,y,z,t)-h_0(x_o-\Delta x,y,z,t)}{2\Delta x} \qquad (۷-۲)$$

- تخمین اختلاف پیش‌رو

$$\frac{\partial h}{\partial x}\cong\frac{h(x_o,y,z,t)-h(x_o+\Delta x,y,z,t)}{\Delta x} \qquad (۸-۲)$$

- تخمین اختلاف پسرو

$$\frac{\partial h}{\partial x}\cong\frac{h(x_o,y,z,t)-h(x_o-\Delta x,y,z,t)}{\Delta x} \qquad (۹-۲)$$



نمودار ۲-۵- شبکه تفاضل محدود

در بین سه روش مذکور روش تخمین اختلاف مرکزی جهت تخمین مقدار تغییرات تابع h مناسب‌تر می‌باشد اگرچه در مجاورت مرزهای شبکه تخمین مقدار تابع h توسط این روش امکان‌پذیر نمی‌باشد.

با توجه به نمودار۲-۵، مشتق دوم تابع h حول نقطه x_o و در جهت محور x ها از طریق رابطه (۲-۱۰) محاسبه می‌شود.

1-Truncation erro

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \cong \frac{h(x_o + \Delta x, y_o) - 2h(x_o, y_o) + h(x_o - \Delta x, y_o)}{(\Delta x)^2} \qquad (۱۰-۲)$$

به همین روش مشتق دوم تابع h حول نقطه x_o در جهت محور yها از طریق رابطه (۲-۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cong \frac{h(x_o, y_o + \Delta y) - 2h(x_o, y_o) + h(x_o, y_o - \Delta y)}{(\Delta y)^2} \qquad (۱۱-۲)$$

بنابراین با فرض آن که شبکه مربعی باشد ($\Delta x = \Delta y$) آنگاه شکل دوبعدی معادله لاپلاس به صورت رابطه (۲-۱۲) بیان می‌شود.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{h(x_o + \Delta x, y_o) - 4h(x_o, y_o) + h(x_o - \Delta x, y_o) + h(x_o, y_o + \Delta y) + h(x_o, y_o - \Delta y)}{(\Delta x)^2} = 0 \qquad (۱۲-۲)$$

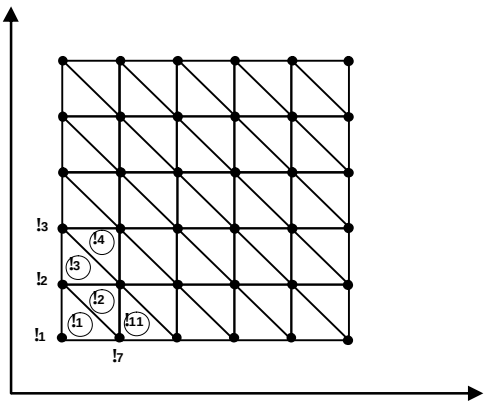
و نتیجه آن‌که:

$$h(x_o, y_o) = (h(x_o + \Delta x, y_o) + h(x_o - \Delta x, y_o) + h(x_o, y_o + \Delta y) + h(x_o, y_o - \Delta y))/4 \qquad (۱۳-۲)$$

رابطه (۲-۱۲) که در واقع بیان تفاضل عددی معادله لاپلاس می‌باشد به نام عملگر پنج نقطه‌ای مطرح می‌باشد. به این معنی که مقدار تابع h در هر گره از شبکه برابر با متوسط مقادیر تابع مذکور در چهار گره اطراف گره مورد نظر می‌باشد.

۲-۷-۲- روش اجزا محدود

روش اجزای محدود یکی از روش‌های غیرمستقیم عددی متداول است که در حل عددی معادله حاکم بر حرکت آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. در این روش ابتدا حوضه مورد بررسی به اجزای چندضلعی به اندازه کافی کوچک تقسیم می‌شود تا جایی که تغییرات تابع مجهول (پتانسیل h) در داخل هر جز را بتوان خطی در نظر گرفت. چند ضلعی را می‌توان به شکل‌های مختلف انتخاب نمود. متداول‌ترین نوع چندضلعی که بیش‌تر انتخاب می‌شود مثلث می‌باشد زیرا با اجزای مثلثی بهتر می‌توان یک شبکه مناسب منطبق بر مرزهای نامنظم حوزه ایجاد نمود. همچنین چند ضلعی مثلثی منجربه روابط ساده‌تری می‌شود. اندازه اجزا در قسمت‌های مختلف شبکه را می‌توان متفاوت انتخاب نمود به گونه‌ای که در نقاطی از حوضه که اطلاعات بیش‌تر و دقیق‌تر وجود دارد و بیش‌تر مورد توجه می‌باشد، اجزا کوچک‌تر و در نتیجه شبکه فشرده‌تر انتخاب می‌شود و برعکس در نقاطی که اطلاعات کم‌تر است و کم‌تر مورد توجه می‌باشد اجزا بزرگ‌تر و شبکه گسترده‌تر در نظر گرفته می‌شود. نمودار (۲-۶) مثالی از یک شبکه با اجزا مثلثی را نمایش می‌دهد.



نمودار ۲-۶- شبکه‌ی اجزا محدود مثلثی

رئوس مثلث‌ها گره‌های شبکه را تشکیل می‌دهند که هر یک با شماره‌ای مشخص می‌شود. معمولا ابتدا گره‌های داخلی شماره‌گذاری می‌شود، سپس این عمل برای گره‌های روی مرزهای حوضه انجام می‌شود. سپس شماره‌گذاری اجزا صورت می‌گیرد به این ترتیب هر جز دارای یک شماره خواهد شد.

نحوه شبکه‌بندی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که تا حد امکان موقعیت گره‌ها در شبکه منطبق بر موقعیت پیزومترها در حوضه باشد. همچنین می‌توان مثلث ها را منطبق با تغییرات ضرایب هیدرودینامیک به طور مناسب انتخاب کرد.

هدف نهایی محاسبه پتانسیل (h) به عنوان تابع مجهول در هر گره از شبکه می‌باشد. معادله عمومی‌جریان ماندگار و دوبعدی در یک سامانه آب زیرزمینی مطابق رابطه (۲-۱۴) می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_y \frac{\partial h}{\partial y}) = q \qquad (۱۴-۲)$$

ابر تابع[1] معادله فوق برای یک جز e به صورت رابطه زیر می‌باشد.

$$E_e = \iint \left\{ \frac{1}{2}[T_x (\frac{\partial h}{\partial x})^2 + T_y (\frac{\partial h}{\partial y})^2] - qh \right\} dxdy \qquad (۱۵-۲)$$

با توجه به اینکه تغییرات پتانسیل h در داخل هر جز خطی فرض گردید مشتق رابطه (۲-۱۶) بر حسب h_i h_j و h_k خطی خواهد بود به طوری که رابطه زیر برقرار است.

$$\frac{\partial E}{\partial h_i} = \sum \frac{\partial E_e}{\partial h_i} \qquad (۱۶-۲)$$

که علامت مجموعه در رابطه فوق مربوط به تمام اجزایی می‌شود که در راس i با هم مشترک می‌باشند. چنان‌چه این مشتق برابر صفر قرار داده شود برای هر گره i که تابع مجهول (پتانسیل h) در آن مجهول است یک معادله خطی حاصل می‌شود که مقدار پتانسیل در آن گره (h_i) را با مقدار پتانسیل در گره‌های نزدیک مرتبط می‌سازد. به این ترتیب یک دستگاه معادلات خطی شامل N معادله و N مجهول تشکیل می‌شود (N تعداد گره‌ها) که به صورت ماتریس نوشته می‌شود.

$$[A]_{N,N} \cdot [H]_{N,1} = [B]_{N,1} \qquad (۱۷-۲)$$

که $[A]_{NN}$ یک ماتریس مربعی و $[H]_{N1}$ و $[B]_{N1}$ ماتریس های ستونی با بعد $N \times 1$ می‌باشند. عناصر ماتریس $[H]_{N1}$ پتانسیل‌های مجهول در روی گره‌ها می‌باشند و عناصر ماتریس $[B]_{N1}$ مقادیری معلوم می‌باشند. بنابراین با حل رابطه مزبور مقادیر تابع مجهول (پتانسیل h) در گره‌های مختلف به‌دست می‌آید. حل رابطه شامل دو مرحله می‌باشد:

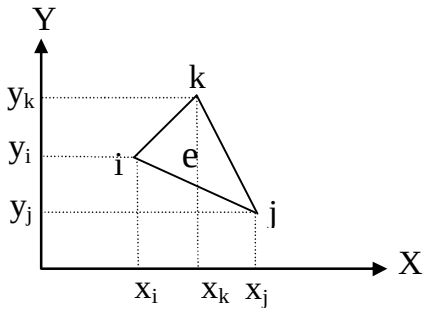
- تشکیل دستگاه معادلات خطی
- حل دستگاه معادلات

دستگاه معادلات خطی برای یک جز و برای یک گره i به ترتیب زیر تشکیل می‌شود:

الف ـ نحوه تشکیل دستگاه معادلات خطی مربوط به یک جز e از شبکه:

یک جز e (مثلث با رئوس k j i) مطابق شکل زیر در نظر گرفته می‌شود.

1- Functional



نمودار ۲-۷- جز e از یک شبکه اجزای محدود

آن‌گاه مشتقات $\frac{\partial E_e}{\partial h_i},\frac{\partial E_e}{\partial h_j},\frac{\partial E_e}{\partial h_k}$ بر حسب پتانسیل‌های h_I h_j و h_k به صورت دستگاه زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{vmatrix}\frac{\partial E_e}{\partial h_i}\\ \frac{\partial E_e}{\partial h_j}\\ \frac{\partial E_e}{\partial h_k}\end{vmatrix}=\frac{1}{2A_e}\begin{vmatrix} k_x(y_k-y_j)(y_k-y_j)+k_y(x_k-x_j)(x_k-x_j)\\ k_x(y_i-y_k)(y_k-y_j)+k_y(x_j-x_k)(x_k-x_j)\\ k_x(y_j-y_i)(y_k-y_j)+k_y(x_j-x_i)(x_k-x_j)\end{vmatrix} \qquad (۱۸-۲)$$

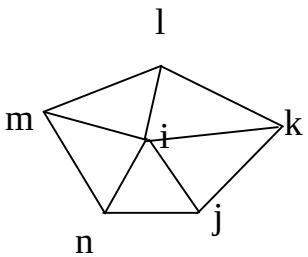
$$\begin{vmatrix} k_x(y_k-y_j)(y_i-y_k)+k_y(x_k-x_j)(x_i-x_k) & k_x(y_k-y_j)(y_j-y_i)+k_y(x_k-x_j)(x_j-x_i)\\ k_x(y_i-y_k)(y_i-y_k)+k_y(x_i-x_k)(x_i-x_k) & k_x(y_i-y_k)(y_j-y_i)+k_y(x_i-x_k)(x_j-x_i)\\ k_x(y_j-y_i)(y_i-y_k)+k_y(x_j-x_i)(x_i-x_k) & k_x(y_j-y_i)(y_j-y_i)+k_y(x_j-x_i)(x_j-x_i)\end{vmatrix}\begin{vmatrix}h_i\\ h_j\\ h_k\end{vmatrix}-\begin{vmatrix}Q_i\\ Q_j\\ Q_k\end{vmatrix}$$

در دستگاه فوق، A_e مساحت جز می‌باشد که از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$A_e=\left|(x_j-x_i)(y_k-y_i)-(y_j-y_i)(x_k-x_i)\right| \qquad (۱۹-۲)$$

ب ـ نحوه تشکیل معادلات مربوط به یک گره i:

به عنوان مثال گره i مطابق شکل روبرو در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۲- گره i در یک شبکه اجزا محدود

آنگاه رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial E}{\partial h_i}=\frac{\partial E_e}{\partial h_i}+\frac{\partial E_{e1}}{\partial h_i}+\frac{\partial E_{e3}}{\partial h_i}+\frac{\partial E_{e4}}{\partial h_i} \qquad (۲۰-۲)$$

با جایگزین نمودن عبارت های طرف دوم رابطه توسط مقادیر آنها از معادلاتی نظیر دستگاه معادلات فوق معادله مربوط به گره i به‌دست می‌آید که یک رابطه خطی بین مقدار پتانسیل در گره i (h_i) را با پتانسیل گره‌های مجاور (h_n h_m h_l h_k h_j) برقرار می‌سازد. به این ترتیب یک دستگاه معادلات خطی نظیر دستگاه معادلات فوق حاصل می‌شود که با حل آن مقدار پتانسیل h در گره‌های مختلف شبکه به‌دست می‌آید. برای حل این دستگاه عموما از روش‌های مستقیم مانند روش حذفی گوس استفاده می‌شود.

۲-۷-۳- روش برنامه‌ریزی پویا

برنامه‌ریزی پویا روشی است برای حل ماتریس‌هایی که در انتهای فرآیند حل معادلات آب‌های زیرزمینی حاصل شده‌اند. این روش یک روش ریاضی برای بهینه‌سازی مسایل تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای می‌باشد. کلمه برنامه‌ریزی از نظر ریاضی به معنی انتخاب کردن بخش بهینه منابع و کلمه پویا به معنی تصمیم‌گیری‌های متوالی در چند مرحله جدا می‌باشد. برنامه‌ریزی پویا برای اولین بار توسط بلمن به کار برده شده است که در سال ۱۹۷۰ به وسیله میراب زاده برای حل معادله جریان در محیط‌های متخلخل به کار گرفته شده است [۲].

در روش برنامه‌ریزی پویا یک مساله تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای به دنباله‌ای از مسایل تصمیم‌گیری یک مرحله‌ای تجزیه می‌شود. بدین معنی که یک مساله N متغیره به صورت دنباله‌ای از N مساله یک متغیره که به طور متوالی حل می‌شود ارائه می‌شود که معمولا حل N مساله فرعی از حل مساله اصلی آسان‌تر می‌باشد.

مسایل تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود:

الف- مسایل با مقدار اولیه: در این‌گونه مسایل مقدار متغیر وضعیت اولیه معلوم می‌باشد.

ب- مسایل با مقدار نهایی: در این‌گونه مسایل مقدار متغیر وضعیت نهایی معلوم می‌باشد.

ج- مسایل کران دار: در این‌گونه مسایل مقادیر متغیرهای ورودی و خروجی هر دو معلوم می‌باشند.

کاربرد برنامه‌ریزی پویا در مواردی است که:

الف- وضعیت سامانه مورد مطالعه به علت وجود حوادث طبیعی و غیرقابل کنترل با زمان تغییر کند.

ب- تعداد N تصمیم در ارتباط با یک سامانه وجود داشته باشد که وضعیت سامانه را در N زمان آینده تغییر دهد.

ج- وضعیت سامانه در هر گام زمانی تحت تاثیر وضعیت سامانه در گام زمانی قبلی باشد و توسط آن مشخص شود.

حل یک مساله به روش برنامه‌ریزی پویا نیاز به استفاده از اصل بهینگی دارد. طبق اصل بهینگی یک خط مشی (یا مجموعه‌ای از تصمیمات) بهینه دارای این خاصیت می‌باشد که تصمیمات باقیمانده باید با توجه به وضعیت به‌دست آمده از اولین تصمیم، یک خط مشی بهینه را تشکیل دهند. بنابراین تامین اصل بهینگی نیاز به تامین دو شرط اساسی دارد:

- تفکیک‌پذیری توابع موجود
- تفکیک‌پذیری بردار وضعیت

- تفکیک‌پذیری توابع

تفکیک‌پذیری تابع $F(x)$ معمولا بدین صورت است که:

$$F(x) = f_1(\alpha_1) + f_2(\alpha_2) + f_3(\alpha_3) + ... + f_n(\alpha_n) \qquad (۲۱-۲)$$

توابع تفکیک شده معمولا هر کدام فقط به یک متغیر بستگی دارند و برخی از توابع که ظاهرا تفکیک‌ناپذیر به نظر می‌رسند را می‌توان از طریق جایگزینی حاصل‌ضرب یا جایگزینی یک تابع تفکیک‌پذیر نمود.

- تفکیک‌پذیری بردار وضعیت

تفکیک‌پذیری بردار وضعیت به این معنی است که برای تصمیم‌گیری x_I در مرحله iام فقط نیاز به مشخص بودن وضعیت در مرحله‌ای بلافاصله ماقبل از شروع آن مرحله می‌باشد و نیازی به وضعیت های پیش از آن مرحله نمی‌باشد. این بدان معنی است که وضعیت بعدی در هر مرحله از تصمیم‌گیری فقط بستگی به وضعیت و تصمیم‌گیری فعلی دارد و می‌توان کلیه وضعیت‌ها و تصمیمات گذشته را نادیده گرفت.

تامین اصول فوق موجب استفاده از نوعی معادلات در برنامه‌ریزی پویا می‌شود که معادلات برگشت‌پذیر خوانده می‌شوند. به طوری که این معادلات در روش‌های مختلف با اندکی تغییرات نسبت به یکدیگر کاربرد پیدا می‌کنند. به طور مثال مراحل تصمیم‌گیری در روش برگشت به عقب به طور معکوس شماره‌گذاری می‌شوند به گونه‌ای که مرحله یکم در واقع آخرین مرحله تصمیم‌گیری بوده و مرحله دوم نشان دهنده اولین مرحله تصمیم‌گیری در واقعیت است.

روش برنامه‌ریزی پویا دارای مزیت‌های اساسی نسبت به روش‌های متداول عددی می‌باشد. بعضی از مزیت‌ها در زیر مطرح شده‌اند.

- در روش‌های عددی غیرمستقیم سرعت همگرایی مطرح می‌باشد که سرعت همگرایی بستگی به یک سری عوامل و ضریب دارد که تعیین اندازه بهینه این ضرایب چندان ساده نمی‌باشد. در صورتی که برنامه‌ریزی پویا یک روش عددی مستقیم می‌باشد و بحث همگرایی و سرعت همگرایی در آن مطرح نمی‌باشد.
- در حوضه‌هایی که دارای شکل هندسی پیچیده و شرایط مرزی متفاوت می‌باشند، روش‌های غیرمستقیم (تکراری) دارای همگرایی کم می‌باشند در حالی که در چنین شرایطی روش برنامه‌ریزی پویا توانایی بیش‌تری دارد.
- معمولا در مسایل جریان آب زیرزمینی شرایط مرزی و میزان تغذیه یا تخلیه از آبخوان کاملا شناخته شده نیست، لذا در روش‌های غیرمستقیم معمولا با فرضیه‌های مختلف برای تعریف شرایط مذکور مساله برای حالت‌های مختلف حل می‌شود. در صورتی که در روش برنامه‌ریزی پویا نیازی به حل مساله برای حالت‌های فرضی مختلف نمی‌باشد.
- در روش‌های غیرمستقیم متداول همواره لازم است که در شروع محاسبات مقادیر اولیه بار هیدرولیکی (h) برای تمام گره‌ها تعریف شود که هر چقدر این مقادیر با مقادیر واقعی اختلاف بیش‌تری داشته باشد تعداد تکرار محاسبات بیش‌تر خواهد بود در حالی که در روش برنامه‌ریزی پویا این‌چنین نمی‌باشد.

۲-۸- ویژگی‌های نرم افزارهای موردنیاز

مجموعه دستوراتی را که رایانه برای حل مدل ریاضی مورد استفاده قرار می‌دهد کد یا برنامه رایانه‌ای می‌نامند. کد یا برنامه رایانه‌ای یک مفهوم عمومی و کلی است، حال آن که یک مدل شامل مجموعه‌ای از شرایط مرزی و اولیه، شبکه، مقادیر پارامتری و تنش‌های هیدرولوژیکی مربوط به یک منطقه خاص می‌باشد. یک کد در شرایط معمولی (که نیازی به اصلاح آن نمی‌باشد) تنها یک بار تهیه می‌شود ولی برای هر بار کاربرد مدل، یک مدل جدید تهیه می‌شود.

از نظر میزان استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای، دو نوع کد وجود دارد: کدهای عمومی‌با قابلیت دسترسی برای همگان[1] مانند برنامه 22MT3 و کدهای اختصاصی که معمولا برای مصارف ویژه و به سفارش مراکز تحقیقاتی خاصی توسعه یافته و در دسترس همه نمی‌باشد.

۲-۸-۱- نکته‌های مهم در انتخاب کد و رابط گرافیکی

در انتخاب کد و رابط گرافیکی[2] برای استفاده در مدل ریاضی آب زیرزمینی مسایل زیر باید مورد نظر قرار گیرند:

- این برنامه قبلا در چند منطقه مورد استفاده قرار گرفته و نقاط ضعف و قوت آن مشخص شده باشد.
- جواب های حاصله از آن با جواب‌های به دست آمده از حل تحلیلی چند مساله مقایسه شده و درستی و دقت آن تایید شده باشد.
- در صورت استفاده از برنامه اختصاصی ضرورت آن توجیه شود.
- برنامه موردنظر شامل مادولی برای محاسبه بیلان آب باشد تا بتوان جریان از مرزها، از منابع تغذیه و تخلیه و همچنین میزان تغذیه از سطح ایستابی و تخلیه به آب‌های سطحی را محاسبه نمود و آن را با بیلان دستی مقایسه کرد.
- تا جای ممکن دارای امکانات نمایشی مناسب برای ارائه خروجی مدل به گونه‌ای محسوس و قابل درک برای کارشناسان باشد.
- امکان استفاده از حجم بالایی از حافظه رایانه را داشته باشد به گونه‌ای که بتوان به منظور بالا بردن دقت مدل تعداد کافی سلول و لایه برای مساله موردنظر تعریف نمود.
- تا جای ممکن امکان خواندن فایل‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) را دارا باشد.
- توانایی شبیه‌سازی ویژگی‌های ارائه شده در مدل مفهومی (سامانه جریان دوبعدی یا سه‌بعدی هندسه و هیدرولیک آبخوان چندگانه و لایه نفوذناپذیر سامانه‌های گسلی بارندگی تبخیر و تعرق چاه‌ها زهکش‌ها شرایط مرزی و تغییرات پارامترها نسبت به زمان و مکان) را داشته باشد.
- بسته به شرایط مساله، توانایی شبیه‌سازی سامانه جریان غیر اشباع را داشته باشد.
- در صورت اهمیت جریان‌های در جهت قائم، حداقل از برنامه مدل شبه‌سه‌بعدی استفاده شود.
- در صورت وجود جریان در محیط درز و شکاف‌دار یا انحلالی، از برنامه هایی که تخلخل مضاعف را به شکل یک محیط متخلخل دانه‌ای معادل شبیه‌سازی می‌کند، استفاده شود.
- چنان‌که جریان در مناطقی با شوری یا دمای بالا صورت می‌گیرد از برنامه‌ای استفاده شود که تاثیر چگالی را نیز شبیه‌سازی می‌نماید.

در گزینش نهایی یک کد ممکن است، مواردی همچون در دسترس بودن رابط گرافیکی آن و خدمات پس از فروش نرم‌افزار نیز موثر باشد.

1-Public domain codes

۲- منظور از کد برنامه کامپیوتری است که به منظور حل عددی مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد (مثل MODFLOW). رابط گرافیکی عبارت از نرم‌افزاری است که برنامه کامپیوتری مزبور را به عنوان موتور اصلی بکار گرفته و نقش پیش پردازنده و پس پردازنده را بر روی داده‌های مدل ایفا می‌نماید (مانند Visual MODFLOW یا Processing MODFLOW). در این قسمت دو مفهوم کد و رابط گرافیکی به صورت توام و تحت عنوان برنامه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

پیش از استفاده از برنامه برای یک مساله خاص، بهتر است برنامه را برای یک مساله ساده با جواب معلوم که در راهنمای نرم‌افزار وجود ندارد، اجرا نمود. ساخت فایل‌های داده‌ای برای این مساله می‌تواند کاربر را با ساختار فایل‌های ورودی مناسب برای برنامه آشنا سازد.

جدول (۲-۲) ویژگی‌های برخی از کدهای موجود در زمینه آب‌های زیرزمینی را مورد اشاره قرار داده است. از جمله کدهایی که کاربردهای گسترده‌ای داشته و از مقبولیت بالایی نزد هیدروژئولوژیست‌ها برخوردار بوده کد MODFLOW می‌باشد که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا ارائه شده است. رابط‌های گرافیکی گوناگونی برای این کد تهیه شده‌اند که برخی از ویژگی‌های آنها در جدول (۲-۳) آورده شده است. دلیل اصلی مقبولیت این کد (هر چند نمی‌توان آن را برای همه موارد تخصصی مطالعه مدل پیشنهاد نمود) این است که برای راه‌حل‌های تحلیلی گوناگونی ارزیابی و کنترل شده و سامانه‌های هیدروژئولوژیکی مختلفی در سراسر جهان را شبیه‌سازی نموده است. همچنین نرم افزارهای مختلف آن ارزان و در دسترس همگان می‌باشد.

از جمله ویژگی‌های دیگر MODFLOW می‌توان به ساختار مدولی آن اشاره نمود. بدین ترتیب که می‌توان برای فرآیندهای خاص هیدرولوژیکی مدول خاصی را فعال یا غیرفعال نمود. همچنین مدول‌های جدیدی برای مسایل مربوط به جریان (مثل اندرکنش جریان رودخانه با آبخوان) یا روش‌های عددی جدید در حال توسعه می‌باشند. این دلایل سبب شده MODFLOW از سوی بسیاری از سازمان‌ها به عنوان نرم‌افزار برتر مورد استفاده قرار گیرد. حداقل پارامترهای مورد نیاز برای این برنامه در جدول (۲-۴) ارائه شده است.

۲-۸-۲- بخش‌های مختلف برنامه

مدول‌های مختلف برنامه MODFLOW به ترتیب زیر می‌باشند:

- مدول چگالی

استفاده از مدول چگالی هنگامی صورت می‌گیرد که چگالی آب در یک «لایه چگالی» در سلول‌های مختلف متفاوت می‌باشد. در شبیه‌سازی جریان، جریان‌های وابسته به چگالی به کمک تصحیح بارهای هیدرولیکی به بارهای هیدرولیکی آب شیرین (یا بارهای هیدرولیکی چگالی مرجع) برای سامانه معادلات جریان تعریف می‌شوند. فرض می‌شود توزیع چگالی و مقادیر قابلیت انتقال بین گره‌ها در طول شبیه‌سازی ثابت می‌ماند.

- مدول زهکش

در این مادول اثر زهکش بر سامانه آب زیرزمینی شبیه‌سازی می‌شود.

جدول ۲-۲- معرفی چند کد مدل‌سازی سه‌بعدی آب های زیرزمینی[۱۸]

نام کد	مشخصات مدل	توسعه دهنده و پشتیبانی	عرضه کننده	قیمت (سال۲۰۰۰)	روش حل	توانایی در ارتباط رودخانه با آب زیرزمینی
MODFLOW	شبه سه‌بعدی جریان	USGS*	USGS SS CV	۲۰۰ $	FD	از بهترین کدها در این زمینه می‌باشد
MODFLOW – SURFACT	شبه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول	HYDROGEOLOGIC* (بر اساس MODFLOW)	HGL SS CD	۶۰۰۰ $	FD	عالی
MODFLOWT	نیمه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول	HYDROSOLVE HS1-GeoTrans*	HIS SS CV*		FD	عالی
MT3D	شبه سه‌بعدی انتقال محلول	USEPA* Papadopouls*	SS CV		FD	MOC MT3D Path3D Modpath همگی برای سامانه جریان از MODFLOW استفاده می‌کنند.
MOC3D	شبه سه‌بعدی انتقال محلول	USGS*	USGS SS CV		FD	
AQUIFEM-N	شبه سه‌بعدی جریان	Lloyd Townley*	SS	۱۵۰۰ $	FE	قابل قبول
AQUA3D	شبه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول		SS	۳۲۰۰ $	FE	خوب
FEMWATER	شبه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول		SS		FE	قابل قبول
SUTRA	شبه سه‌بعدی جریان انتقال محلول و دوبعدی جریان	HIS-*GTSSCV	HIS-GT SS CV		FE	قابل قبول

PMwin: Processing Modflow for windows
Visual Modflow
Groundwater Modeling System

GV: Groundwater Vistas
شرکت‌های فروش نرم افزار*

VM:
GMS:

ادامه جدول ۲-۲- معرفی چند کد مدل‌سازی سه‌بعدی آب های زیرزمینی[۱۸]

نام کد	مشخصات مدل	توسعه دهنده و پشتیبانی	عرضه کننده	قیمت (سال۲۰۰۰)	روش حل	توانایی در ارتباط رودخانه با آب زیرزمینی
MODFLOW	شبه سه‌بعدی جریان	USGS*	USGS SS CV	۲۰۰ $	FD	از بهترین کدها در این زمینه می‌باشد
MODFLOW – SURFACT	شبه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول	HYDROGEOLOGIC* (بر اساس MODFLOW)	HGL SS CD	۶۰۰۰ $	FD	عالی
MODFLOWT	نیمه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول	HYDROSOLVE HS1-GeoTrans*	HIS SS CV*		FD	عالی
MT3D	شبه سه‌بعدی انتقال محلول	USEPA* Papadopouls*	SS CV		FD	MOC MT3D Path3D Modpath همگی برای سامانه جریان از MODFLOW استفاده می‌کنند.
MOC3D	شبه سه‌بعدی انتقال محلول	USGS*	USGS SS CV		FD	
AQUIFEM-N	شبه سه‌بعدی جریان	Lloyd Townley*	SS	۱۵۰۰ $	FE	قابل قبول
AQUA3D	شبه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول		SS	۳۲۰۰ $	FE	خوب
FEMWATER	شبه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول		SS		FE	قابل قبول
SUTRA	شبه سه‌بعدی جریان انتقال محلول و دوبعدی جریان	HIS-*GTSSCV	HIS-GT SS CV		FE	قابل قبول

PMwin: Processing Modflow for windows
Visual Modflow
Groundwater Modeling System

GV: Groundwater Vistas
شرکت‌های فروش نرم‌افزار*

VM:
GMS:

ادامه جدول ۲-۲- معرفی چند کد مدل‌سازی سه‌بعدی آب های زیرزمینی[۱۸]

نام کد	مشخصات مدل	چگالی آب	رابط گرافیکی	ارزیابی با مطالعات موردی		
MODFLOW	شبه سه‌بعدی جریان	در حال توسعه	PMwin GV VM GMS	بلی		
MODFLOW – SURFACT	شبه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول	در حال توسعه	GV (سازگار با Pmwin GMS VM	بلی		
MODFLOWT	نیمه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول	خیر	GV (سازگار با Pmwin GMS VM	بلی		
MT3D	شبه سه‌بعدی انتقال محلول	خیر	Pmwin GV VM GMS	بلی		
MOC3D	شبه سه‌بعدی انتقال محلول	خیر	Pmwin GV VM GMS	بلی		
AQUIFEM-N	شبه سه‌بعدی جریان	خیر	بلی	بلی		
AQUA3D	شبه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول	خیر	در خود برنامه موجود است			
FEMWATER	شبه سه‌بعدی جریان و انتقال محلول	بلی	می‌تواند از GMS استفاده کند			
SUTRA	شبه سه‌بعدی جریان انتقال محلول و دوبعدی جریان	بلی	در خود برنامه موجود است	بلی		

PMwin: Processing Modflow for windows
VM: Visual Modflow
Groundwater Modeling System

GV: Groundwater VistasGMS:
شرکت‌های فروش نرم‌افزار*

جدول ۲-۳- ویژگی‌های رابط‌های گرافیکی کد MODFLOW

نرم افزار	Groundwater Vistas	Modflow Surfact	Processing Modflow	Visual Modflow	Groundwater Modeling System	Groundwater Vistas	Groundwater Vistas
نام مخفف	GV	MS-VMS	PVWin	VM	GMS	خیر	خیر
قیمت تقریبی	۱۴۰۰ $	۶۰۰۰ $	۱۶۰۰ $	۱۶۰۰ $	۶۰۰۰ - ۳۰۰۰ $	MT3D MODPATH	MT3D MODPATH
توسعه دهنده و پشتیبانی	ESIESI	HydroGeologic	Chiang & Kinzelbach	Waterloo Hydrogeologic	US Dept. of Defence EMSI Brigham Young Univ.	MT3DMS RT3D MOC3D PATH3D ModflowT Surfact Modflow	MT3DMS RT3D MOC3D PATH3D ModflowT Surfact Modflow
توزیع‌کننده	ESI SS CV	ESI HGL SS	توسعه دهنده CV SS	توسعه دهنده CV SS	EMSI CV SS	Pest ۲۰۰۰ و UCODE را پشتیبانی می‌کند	Pest ۲۰۰۰ و UCODE را پشتیبانی می‌کند
توانایی در محیط غیراشباع	بلی به کمک Modflow-Srufactبلی به کمک Modflow-Srufact	بلی. (معادله ریچارد) با شبیه‌سازی جریان فاز هوا	خیر	خیر	با نرم‌افزار Modflow خیر ولی با نرم‌افزار FemWater بلی	فایل‌های شبکه و داده‌های SURFER را می‌خواند و ارسال می‌کند. فایل‌های DXF HPGL وBMP را ارسال می‌کند. انیمیشن سه‌بعدی با Tecplot	فایل‌های شبکه و داده‌های SURFER را می‌خواند و ارسال می‌کند. فایل‌های DXF HPGL وBMP را ارسال می‌کند. انیمیشن سه‌بعدی با Tecplot
توانایی در جریانهای دانسیته‌ای	در حال توسعه	در حال توسعه	نرم افزار دانسیته PMWin	خیر	بلی با نرم‌افزار FemWater	بلی	بلی

ادامه جدول ۲-۳- ویژگی‌های رابط‌های گرافیکی کد MODFLOW

نرم‌افزار	Groundwater Vistas	Modflow Surfact	Processing Modflow	Visual Modflow	Groundwater Modeling System
جریان در محیط درز و شکاف‌دار	خیر	بلی	خیر	خیر	خیر
انتقال محلول و ردیابی ذرات	MT3D MODPATH	MT3D Modpath	MOC3D HT3DMS MT3D PMPath99	MT3D Modpath	MT3D Modpath Moc3D RT3D SEAM3D
نرم افزارهای اضافی مورد نیاز	MT3DMS RT3D MOC3D PATH3D ModflowT Surfact Modflow	RT3D MT3D MOC3D Path3D		MT3DMS MT3D99 RT3D	FemWater Seep2D SEAM3D
واسنجی خودکار	Pest۲۰۰۰ و UCODE را پشتیبانی می‌کند	Pest ۲۰۰۰ و UCODE را پشتیبانی می‌کند	Pest UCODE	WinPest را پشتیبانی می‌کند	محدود
شکل ورودی و خروجی و سازگاری با SURFER	فایل‌های شبکه و داده‌های SURFER را می‌خواند و ارسال می‌کند. فایل‌های DXF HPGL وBMP را ارسال می‌کند. انیمیشن سه‌بعدی با Tecplot	فایلهای شبکه و داده‌ای SURFER را می‌خواند و ارسال می‌کند. فایل‌های DXF HPGL BMP را ارسال می‌کند. انیمیشن سه‌بعدی با Tecplot	فایلهای شبکه و SURFER Georeferenced raster graphic	فایلهای شبکه و داده‌ای SURFER را می‌خواند و ارسال می‌کند. فایلهای DXF EMF و ESRI را ارسال می‌کند. انیمیشن سه‌بعدی با Visual Groundwater	کارآیی‌های GIS خواندن (ArcView Arc/Info) و ارسال DXF با (AutoCad MicroStation)
اصلاح تلسکوپی شبکه	بلی	بلی	بلی	خیر	بلی

ادامه جدول ۲-۳- ویژگی‌های رابط‌های گرافیکی کد MODFLOW

نرم افزار	Groundwater Vistas	Modflow Surfact	Processing Modflow	Visual Modflow	Groundwater Modeling System
چشم‌انداز نمایشی	پلان و نیمرخ	پلان و نیمرخ	پلان در مدل جریان پلان و نیمرخ در ردیابی ذرات انیمیشن محدود بردارهای جریان	پلان و نیمرخ	پلان و نیمرخ هدها افتها و بردارهای سرعت و انیمیشن
آنالیز حساسیت پارامترها	خودکار	خودکار	خیر	خیر	محدود
وضعیت کنونی توسعه مدل	در حال توسعه به ویژه در قسمت جریان‌های دانسیته‌ای	در حال توسعه برای مدل‌سازی آب‌های سطحی و زیرزمینی توانایی برای جریان غیراشباع و جریان در محیط درز و شکاف‌دار (تخلخل دوگانه و شکستگی منفصل جریان‌های دانسیته‌ای و تجزیه بیولوژیکی	در حال توسعه برای افزودن نرم افزار MODBRANCH برای شبیه‌سازی اندرکنش رودخانه ـ آبخوان	در حال توسعه	در حال توسعه براساس برنامه Modflow با اینترفیس های افزوده شده برای مدل‌های دیگر توانایی محاسبات ماتریسی مادولهای اضافه برای محاسبات زمین آماری دو و سه‌بعدی لاگ گمانه‌ها دیاگرام‌های نرده‌ای منحنی‌های هم سطح (iso-surface)
توضیحات	ابزارهای عالی در طراحی و ویرایش مدل و همچنین در محاسبات مهندسی دارای Scroll bar و help قوی و پشتیبانی فنی کامل	توانایی های بالا ولی بسیار گران. از ویژگیهای مهم آن می‌توان به توانایی مدل‌سازی جریان غیراشباع (شامل فاز هوا) شبیه‌سازی ماندگار فرآیندهای dewatering rewetting شامل ارتباط هیدرولیکی بین آبخوان‌های معلق و سطح ایستابی زیرین و ویژگیهای GV اشاره نمود.	ابزارهای عالی برای طراحی و ویرایش مدل محاسبات ماتریسی ولی بدون help scroll bar قوی و پشتیبانی فنی نسخه چهار PMWin به رایگان در دسترس می‌باشد.	بدون Scroll bar help ضعیف پشتیبانی فنی ضعیف، محاسبات ماتریسی پایه‌أی، توانایی ویرایشی ضعیف برای سلول‌های منفرد	توانایی عالی در توسعه و نمایش داده‌های گمانه‌ها solids Modeling با اندرکنش قوی زمین آماری و GIS . بسیار قوی در توسعه مدل مفهومی‌و برگرداندن آن به داده‌های Modflow و Femwater

جدول ۲-٤- حداقل پارامترهای آبخوان موردنیاز برای MODFLOW

وضعیت آبخوان	آب گذری T	هدایت هیدرولیکی افقی Kh	هدایت هیدرولیکی عمودی KV	نشت عمودی Vcont	شکل هندسی لایه		ضریب ذخیره S	آبدهی ویژه Sy	تخلخل (برای ردیابی ذرات)
					لایه بالایی	لایه پایینی			
آبخوان محبوس (۲D)	*	(*)			(*)	(*)			
Steady state	*	(*)			(*)	(*)	*	(*)	
Transient	*	(*)			*	*	*	(*)	*
Solute Transport									
آبخوان محبوس (۳D)	*	(*)	(*)	*	(*)	(*)			
Steady state	*	(*)	(*)	*	(*)	(*)	*	(*)	
Transient	*	(*)	(*)	*	(*)	(*)	*	(*)	*
Solute Transport									
آبخوان آزاد (۲D)		*			*	*			
Steady state	(*)	*			*	*		*	
Transient	(*)	*			*	*		*	*
Solute Transport									
آبخوان آزاد و محبوس (۳D)	(*)	*	(*)	(*)	*	*			
Steady state	(*)	*	(*)	(*)	*	*	*	*	
Transient	(*)	*	(*)	(*)	*	*	*	*	*
Solute Transport									

*: حداقل پارامتر مورد نیاز

(*): پارامتر جایگزین

- مدول تبخیر و تعرق

این زیر برنامه اثرات تعرق گیاهی و تبخیر مستقیم از آبخوان را شبیه‌سازی می‌کند.

- مدول (General – Head Boundary)

زیر برنامه GHB برای شبیه‌سازی مرزهای وابسته به بار هیدرولیکی (Cauchy boundary condition) به‌کار می‌رود.

- مدول سد جریان افقی

مدول سد جریان افقی اثر ساختارهای زمین‌شناسی با تراوایی کم مانند گسل های عمودی و یا دیواره‌های مصنوعی را که از جریان افقی آب زیرزمینی جلوگیری می‌کنند شبیه‌سازی می‌کند.

- مدول ذخیره بین لایه‌ای

این مدول در شبیه‌سازی جریان‌های ماندگار کاربرد ندارد و بنابراین در این حالت‌ها فعال نمی‌باشد. آب زیرزمینی در شرایط افت بار هیدرولیکی از ذخیره آبخوان آزاد می‌شود. حجم آب آزاد شده متناسب با تراکم‌پذیری خاک و آب می‌باشد، زیرا افت بار هیدرولیکی منجربه کاهش فشار آب و افزایش تنش موثر می‌شود. افزایش تنش موثر روی اسکلت خاک باعث تغییر شکل و متراکم شدن زمینه خاک می‌شود. زیر برنامه ذخیره بین لایه‌ای، حجم آب آزاد شده از ذخیره را محاسبه کرده و تراکم (تحکیم) الاستیک یا غیرالاستیک لایه‌های ریزدانه تراکم‌پذیر در آبخوان را که ناشی از برداشت از آب زیرزمینی می‌باشد، شبیه‌سازی می‌نماید.

- مدول تغذیه

این زیر برنامه برای شبیه‌سازی تغذیه توزیع شده در سامانه آب زیرزمینی به کار می‌رود.

- مدول مخزن

در این مدول اثر مخزن‌های آب سطحی بر سامانه آب زیرزمینی شبیه‌سازی می‌شود. زیر برنامه مخزن برای مواردی ارائه شده که سطح مخازن در منطقه بسیار بزرگ‌تر از سطح هر سلول می‌باشد.

- مدول رودخانه

این مدول برای شبیه‌سازی جریان بین یک آبخوان و آب های سطحی مانند رودخانه، دریاچه و مخزن ارائه شده است.

- مدول روندیابی نهر

این مدول برای برآورد جریان در نهرها و جریان‌های سطحی و شبیه‌سازی اندرکنش جریان‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی ارائه شده است.

- مدول (Time –Variant Specified – Head)

برای شبیه‌سازی‌های رژیم ناماندگار مدول TVSH این امکان را به سلول‌های با بار هیدرولیکی ثابت می‌دهد که برای هر گام زمانی مقادیر مختلفی داشته باشند.

- مدول چاه

این مادول برای شبیه‌سازی اثر چاه پمپاژ بر سامانه آب زیرزمینی ارائه شده است.

۲-۹- معیارهای تقسیم‌بندی گستره مدل به اجزای کوچک‌تر

همان‌طور که در قسمت روش‌های حل عددی اشاره شده است برای حل معادلات دیفرانسیل جزیی باید محیط را به اجزای کوچک‌تر تقسیم کرد. در روش تفاضل‌های محدود معمولا منطقه مطالعاتی با استفاده از خطوط موازی عمود بر هم یا غیر عمود در فضای منحنی الخط به تعدادی جز چهار ضلعی (سلول) تقسیم می‌شود. در روش اجزای محدود یا حجم محدود، منطقه به تعدادی المان چندضلعی تقسیم می‌شود. هر قدر ابعاد سلول‌ها کوچک‌تر باشد تعداد سلول‌ها بیش‌تر شده و دقت محاسبات افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد سلول‌ها، داده‌های ورودی بیش‌تری مورد نیاز بوده و حجم کار آماده‌سازی داده‌ها و نیز حجم عملیات محاسباتی به مراتب بیش‌تر خواهد شد، البته در مناطق دور از محل‌های مورد توجه و مکان‌های فاقد آمار و اطلاعات، کوچک کردن اندازه سلول‌ها کمک چندانی به افزایش دقت محاسبات نمی‌کند. از سوی دیگر (با توجه به مسایلی همچون ناهمگنی آبخوان) انتخاب سلول‌هایی با ابعاد بزرگ باعث ایجاد خطا و عدم دست‌یابی به نتایج با دقت قابل قبول می‌شود. عوامل موثر بر اندازه سلول در جدول (۲-۵) ارائه شده‌اند.

۲-۹-۱- اهداف تقسیم‌بندی منطقه مدل

به طور کلی تقسیم‌بندی محدوده مدل به اجزای کوچک‌تر با توجه به اهداف زیر صورت می‌گیرد:

- افزایش پایداری و همگرایی حل مدل
- افزایش دقت مدل
- کاهش پراکندگی عددی
- کاهش محدودیت‌های محاسباتی همچون حافظه، ظرفیت و زمان اجرای مدل
- سازگاری عددی

جدول ۲-۵- عوامل موثر بر اندازه و تعداد سلول‌ها [۲۰]

عامل	اثر عامل بر اندازه شبکه
اهداف مطالعه	اندازه منطقه مدل و مناطق با شبکه‌بندی کوچک‌تر
مناطق بحرانی و طول دوره موردنظر	اندازه منطقه مدل
موقعیت مناطق تغذیه و تخلیه	مناطق با شبکه‌بندی کوچک‌تر
ناهمگنی و غیریکنواختی	جهت یابی و اصلاح شبکه
سرعت انتشار ذرات و ضریب تاخیر	اندازه سلول‌ها و منطقه مدل
مرزهای طبیعی	محدودیت اندازه سلول‌ها برای شبیه‌سازی مرز
پایداری عددی	محدودیت نسبت اندازه های سلول‌ها
دقت عددی	محدودیت در اندازه سلول‌ها
زمان محاسبه	محدودیت در تعداد کل سلول‌ها
دقت میدان جریان	شبکه‌بندی کوچک‌تر در مناطق با گرادیان هیدرولیک بیش‌تر
دقت پراکندگی غلظت	شبکه‌بندی کوچک‌تر در مناطق با گرادیان هیدرولیک بیش‌تر

۲-۹-۲- معیارهای مهم در طراحی شبکه منطقه مدل

به طور خلاصه در طراحی شبکه مدل که از حساس‌ترین مراحل مدل‌سازی است باید به معیارهای زیر توجه نمود:

- شبکه به گونه‌ای طراحی شود که تمام محدوده مطالعاتی را دربرگیرد. معمولا هر چه وسعت منطقه مدل بیش‌تر باشد فواصل شبکه‌بندی بزرگ‌تر و هر چه دقت عددی مورد نیاز بیش‌تر باشد، این فواصل کوچک‌تر انتخاب می‌شوند. افزایش بیش از اندازه تعداد سلول‌ها منجر به اعمال محدودیت‌های محاسباتی در حافظه، ظرفیت و زمان اجرای مدل خواهد شد.
- بسته به هدف مطالعه، فواصل شبکه‌بندی در محدوده‌هایی که بیش‌تر موردنظر می‌باشند (محدوده‌های اجرای طرح یا محدوده‌های بحرانی) کوچک‌تر انتخاب می‌شوند.
- می‌توان اندازه ابعاد سلول (Δx و Δy و Δz) را در تمام گستره شبکه مدل یکنواخت (و البته نه مساوی با هم) در نظر گرفت ولی در این حالت نمی‌توان اندازه سلول را در مناطق بحرانی کوچک‌تر نمود. بنابراین معمولا شبکه‌بندی را باید نامنظم انتخاب نمود.
- در مناطقی در درون محدوده مدل که منابع آب سطحی (همچون رودخانه‌ها یا دریاچه‌ها) ارتباط هیدرولیکی با آبخوان دارند سلول‌ها ریزتر انتخاب می‌شوند.
- در مناطقی که تغییرات محسوسی در مقادیر پارامترهای هیدروژئولوژیک یا ارتفاع سطح آب آبخوان وجود دارد (محیط غیریکنواخت) تا جای ممکن گره‌ها نزدیک به هم در نظر گرفته می‌شوند.
- هر چه تراکم نقاط تغذیه و تخلیه بیش‌تر باشد، اندازه سلول‌ها کوچک‌تر انتخاب می‌شود.
- در مناطقی که گرادیان هیدرولیکی (یا شیب تغییرات پارامترهای کیفیتی) شدیدتر است، فواصل گره‌ها کوچک‌تر انتخاب می‌شود.
- هر چه داده‌ها بیش‌تر و با کیفیت بهتری در دسترس باشد، برای دست‌یابی به نتایج بهتر می‌توان ابعاد سلول‌ها را کوچک‌تر انتخاب نمود. در غیر این صورت سلول‌ها بزرگ انتخاب می‌شوند.
- از آن‌جایی که معمولا مرزهای آبخوان به صورت خط مستقیم نمی‌باشد، سلول‌ها به طور کامل در محدوده مدل قرار نمی‌گیرند. به این جهت، بهتر است اندازه سلول‌ها در مرزها به گونه‌ای انتخاب شود که حداکثر نزدیکی بین شکل هندسی گستره مدل و شکل هندسی محدوده مطالعاتی برقرار باشد.
- برای شبکه‌های تفاضل محدود، فاکتور گسترش شبکه یا نسبت بعد سلولی بزرگ به بعد سلولی کوچک برای سلول‌های کنار هم، نباید از ۱/۵ بیش‌تر باشد. نسبت سیما یا نسبت بین ابعاد حداکثر و حداقل سلول به صورت ایده آل برابر با واحد می‌باشد و در شبکه‌های تفاضل‌های محدود نباید از ۱۰ بیش‌تر شود. در شبکه‌های اجزای محدود این نسبت از ۵ نباید بیش‌تر باشد [۵].

همچنین فاکتورهای زیر را در جهت‌یابی شبکه باید در نظر داشت:

- عوامل هیدرولوژیک، هیدروژئولوژیک و زمین‌شناسی منطقه: عوامل کلیدی همچون رودخانه‌ها، برکه‌ها و گسل‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند. برای مثال یک زون گسلی که بر جریان آب زیرزمینی اثر می‌گذارد بهتر است به موازات و یا عمود بر محورهای سلول‌ها قرار گیرد.

- جهت غالب جریان آب زیرزمینی: برای کاستن از پراکندگی عددی که حاصل تجزیه بردار سرعت جریان آب زیرزمینی در راستای محورهای سلول‌های شبکه است، باید شبکه را به موازات محور جریان غالب آب زیرزمینی قرار داد. در صورتی که جهت های گوناگونی برای جریان آب زیرزمینی در منطقه مدل وجود دارد، بهتر است جهت یابی شبکه به موازات جریان در مناطق بحرانی باشد.

غیریکنواختی ویژگی‌های هیدرولیکی: از آنجایی که هدایت هیدرولیکی در مدل به صورت مولفه‌هایی در راستای محورهای سلول‌های محاسباتی بیان می‌شود با قرار دادن شبکه به موازات تانسورهای هدایت هیدرولیکی دقت محاسباتی افزایش می‌یابد.

۲-۱۰- میان‌یابی داده‌ها و توزیع آنها بر روی گره‌های مدل

انواع داده‌های مورد نیاز در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی در بخش‌های گذشته این نوشتار مورد اشاره قرار گرفته است. داده‌های صحرایی پس از جمع‌آوری و اصلاح، باید به عنوان مقادیر پارامتری یا متغیر با روش‌های مناسب برای گره‌ها یا سلول‌ها/المان‌ها تعریف شوند. چگونگی توزیع داده‌های گوناگون در گستره مدل بسیار مهم می‌باشد.

۲-۱۰-۱- تطبیق پارامترها با نوع مدل

نخستین مسال‌های که در انتقال داده‌های صحرایی به شبکه باید در نظر داشت تطبیق پارامترها با نوع مدل است. مثلا در مدل‌های کاملا سه‌بعدی و نیمرخ، اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی باید به صورت نقطه‌ای باشد که معمولا به سادگی می‌توان آن را در صحرا به‌دست آورد. در مدل‌های منطقه‌ای دوبعدی و شبه سه‌بعدی به مقادیر میانگین در راستای قائم نیاز می‌باشدکه می‌توان آنها را به صورت غیرمستقیم با میانگین گرفتن از نتایج اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای یا به صورت مستقیم به‌کمک آزمایش‌های پمپاژ در چاه‌هایی که در تمام ضخامت اشباع آبخوان نفوذ کرده باشند، به‌دست آورد.

هنگامی‌که داده‌های صحرایی با نوع مدل تطبیق شد، می‌توان ویژگی‌های آبخوان را برای هر یک از واحدهای آب ـ چینه‌ای (هیدرواستراتیگرافیک) که در مدل مفهومی‌مشخص شده‌اند، تعریف نمود. شبکه به پهنه‌هایی تقسیم‌بندی می‌شود که بسته به گسترش مکانی واحدهای آب ـ چینه‌ای در هر پهنه سلول‌ها و گره‌ها ویژگی‌های مشابهی از آبخوان را دارا هستند(شکل۲-۳).

همچنین ضخامت هر واحد آب ـ چینه‌ای برای هر گره یا سلول تعریف می‌شود. هنگامی‌که واحدهای آب ـ چینه‌ای در مقیاس محلی تعریف شوند ممکن است در یک سلول یا المان دو یا چند واحد رسوبی به صورت بین انگشتی[۱] تداخل نمایند. در این حالت به منظور اعمال ویژگی‌های همه واحدهای رسوبی موجود در سلول یا المان، باید برای درون‌یابی مقدار پارامتر از میانگین هندسی و اگر لایه‌بندی وجود داشته باشد از میانگین ریاضی[۲] استفاده کرد.

مدل تفاضل‌های محدود بار هیدرولیکی را در گره محاسبه می‌کند. مقدار این بار هیدرولیکی مقدار بار هیدرولیکی متوسط برای سلول تفاضل محدود نیز می‌باشد. در یک شبکه بلوک ـ مرکز، ویژگی‌های آبخوان و تنش‌های هیدرولیکی به صورت معمول برای بلوک اطراف گره تعریف می‌شود (شکل ۲-۴).

۱- تداخل بین انگشتی به تغییرات در بافت یا جنس سازندهای رسوبی در راستای افقی گویند.

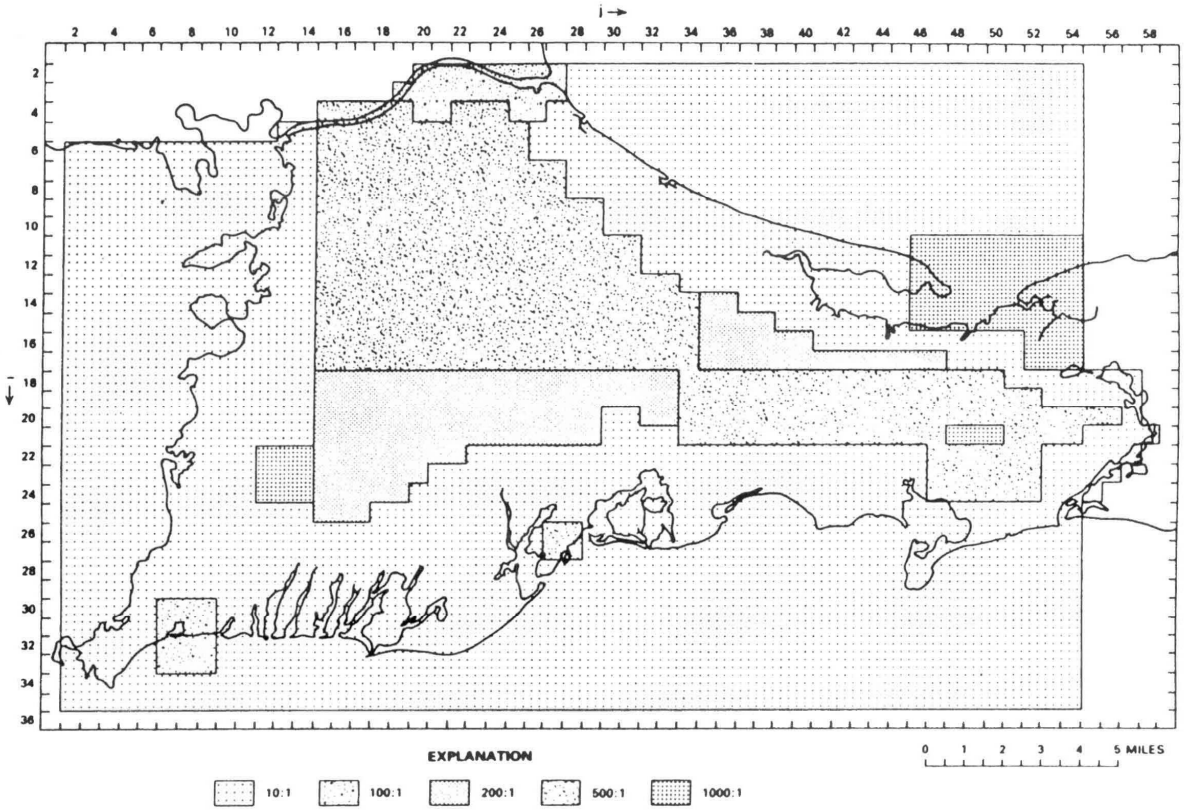
۲- به مجذور حاصل ضرب دو عدد میانگین هندسی و به میانگین حاصل جمع آن دو میانگین ریاضی گویند.

در مدل‌های اجزای محدود، ویژگی‌های آبخوان را می‌توان هم برای گره و هم برای المان تعریف نمود. البته با توجه به ناهمگنی محیط بهتر است، تعریف ویژگی برای گره انجام شود تا به کمک درون‌یابی مقدار آن برای نقاط مختلف المان محاسبه شود. در برخی از کدها (مثل SUTRA) برخی از ویژگی‌ها برای المان و برخی برای گره و برخی برای یک سلول یا منطقه تحت تاثیر پیرامون گره تعریف می‌شود. در مدل AQUIFEM-1 یا AQUIFEM-N ویژگی‌ها را هم برای گره و هم برای المان می‌توان تعریف کرد و این انتخاب بر عهده کاربر می‌باشد. در صورت استفاده از المان‌های مثلثی خطی تعریف ویژگی‌ها برای گره‌ها ساده‌تر از المان‌ها خواهد بود چون تعداد گره‌ها در این نوع شبکه کم‌تراز تعداد المان‌ها می‌باشد.

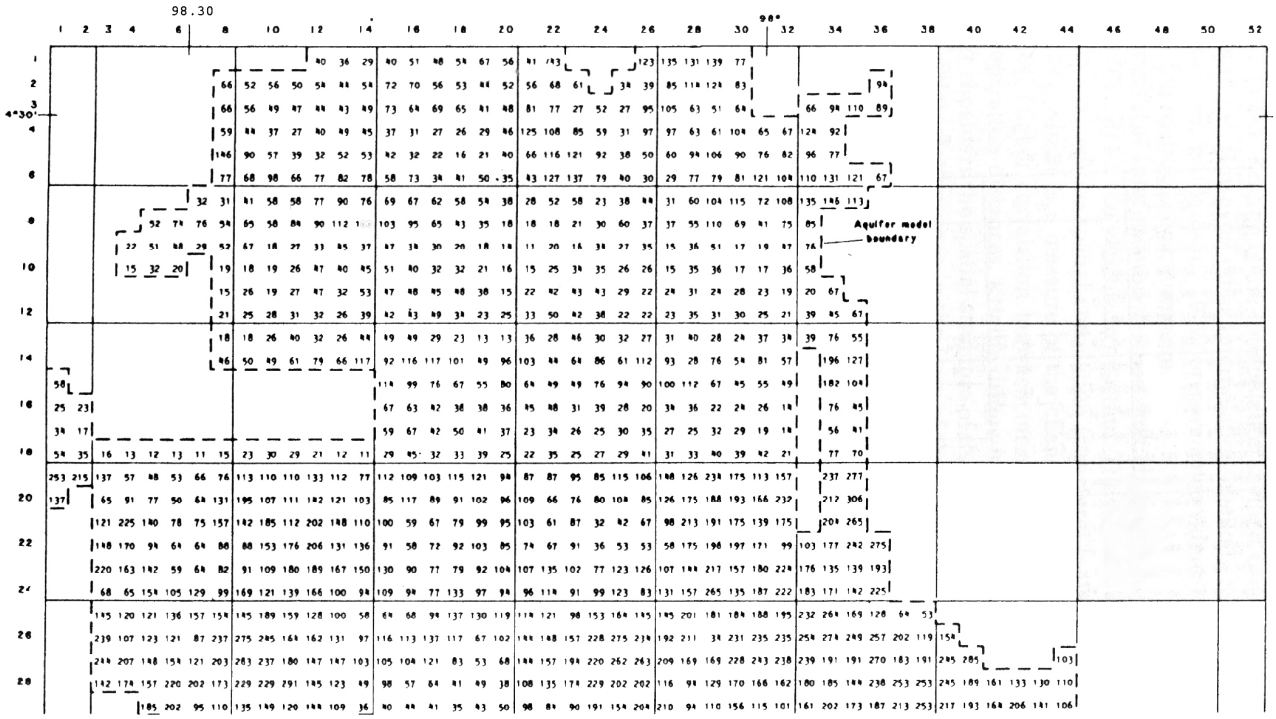
وقتی ویژگی‌های آبخوان از نظر مکانی سریع تغییر می‌کند، تعریف پارامترها باید برای المان‌ها باشد. از آن گذشته، خط مرزی بین دو نوع محیط متخلخل همیشه باید بر مرزهای المان‌ها منطبق باشد.

۲-۱۰-۲- درون‌یابی یا میان‌یابی

از آن جایی که مدل برای هر گره، سلول یا المان به مقدار نیاز دارد و داده‌های صحرایی معمولا پراکنده می‌باشند تعریف پارامترها برای شبکه دشوار می‌باشد. درون‌یابی بین نقاط اندازه‌گیری در تعیین گسترش مکانی داده‌ها در منطقه کمک می‌نماید. روش‌های گوناگونی برای درون‌یابی وجود دارند که از جمله آنها می‌توان به روش درون‌یابی خطی، روش وزنی فاصله معکوس و روش کریجینگ اشاره نمود. در این میان، کریجینگ با توجه به رایج‌تر بودن و دقت مناسب اهمیت زیادی دارد. البته همیشه تجربه و قضاوت هیدروژئولوژیکی عامل نهایی و تعیین‌کننده در تعریف مقدار برای گره‌ها می‌باشد.



شکل ۲-۳- مثالی از پهنه‌بندی منطقه به بخش‌هایی با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی یکسان. در این نقشه پهنه‌های با نسبت آنیزوتروپی عمودی (K_x/K_y)



شکل ۲-٤- مثالی از تعریف مقادیر هدایت هیدرولیکی (K) برای سلول‌های یک شبکه تفاضل‌های محدود. مقادیر میانگین K از نمودارهای(logs) زمین‌شناسی و با توجه به دانه‌بندی برای سلول‌ها تعریف شده‌اند [٥]

الف- درون‌یابی خطی

در این روش نقاط پراکنده‌ی برداشت شده مثلث‌بندی شده و تشکیل شبکه‌ای از مثلث‌های نامنظم[1] را می‌دهند. این شبکه نقاط پراکنده را به هم متصل می‌نماید. معادله صفحه تشکیل شده به وسیله سه ضلع مثلث به ترتیب زیر می‌باشد:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \qquad (۲۲-۲)$$

یا $(B/C)\, y - D/C - (A/C)\, x - z = f(xy) =$

که در آن A، B، C و D با توجه به مختصات راس‌های مثلث محاسبه می‌شوند. این رابطه، معادله‌ی صفحه‌ای است که برای محاسبه‌ی مقدار z در هر نقطه‌ی مثلث به کار می‌رود. در این روش، برون‌یابی در خارج از محدوده‌ی مثلث‌ها امکان ندارد.

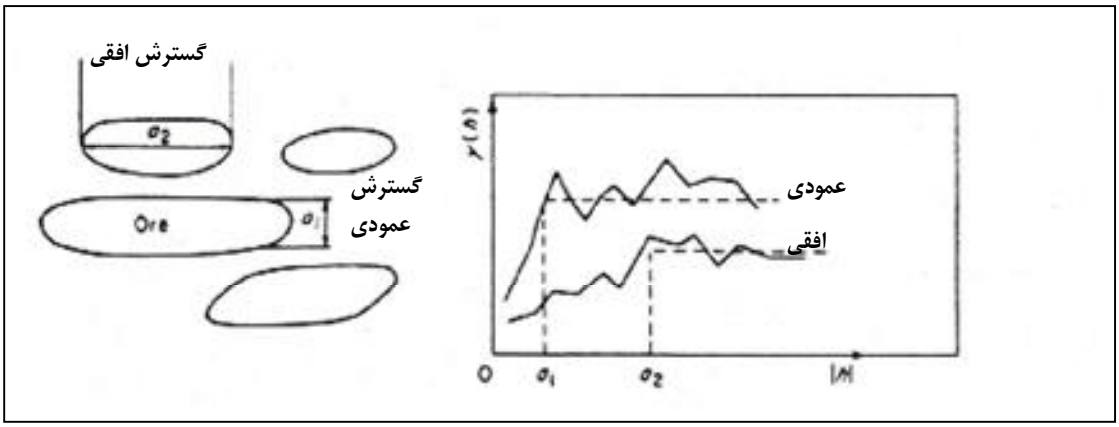
ب- درون‌یابی وزنی فاصله معکوس[2]

این روش یکی از روش‌های رایج برای درون‌یابی نقاط پراکنده می‌باشد. در این روش فرض بر این است که صفحه درون‌یابی بیش‌تر متاثر از نقاط نزدیک خواهد بود تا نقاط دور. صفحه درون‌یابی شده یک میانگین وزنی از نقاط پراکنده می‌باشد و وزن تعریف شده برای هر نقطه پراکنده، با افزایش فاصله بین نقطه درون‌یابی شده با نقطه پراکنده کاهش می‌یابد.

1- Triangular Irregular Network
2- Inverse Distance Weighted interpolation

ج- کریجینگ

کریجینگ یکی از رایج‌ترین روش‌های درون‌یابی می‌باشد که یک روش درون‌یابی آماری برای انتخاب بهترین تقریب خطی بدون انحراف برای متغیر مورد نظر است. در این روش، متغیر یک تابع تصادفی فرض می‌شود که همبستگی مکانی آن به وسیله یک واریوگرام مشخص می‌شود. واریوگرام نموداری است که تغییرات در متغیر را نسبت به مکان نشان می‌دهد (شکل۲-۵). انتظار می‌رود در فواصل مکانی کم تطابق بیش‌تری بین نقاط اندازه‌گیری وجود داشته باشد. اختلاف کریجینگ با دیگر روش‌های درون‌یابی در این است که کریجینگ ساختار مکانی متغیر را در نظر گرفته و خطای درون‌یابی را به صورت انحراف استاندارد مقادیر درون‌یابی شده تخمین می‌زند. چنین تخمینی از خطا هنگامی‌که پیش از واسنجی مدل محدوده‌های قابل قبول تغییر پارامترها تعریف می‌شود، ضروری است. کریگینگ همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده صحرایی در نقطه اندازه‌گیری را برخلاف برخی از دیگر روش‌های درون یابی مانند انطباق کم‌ترین مربعات محفوظ نگاه می‌دارد.



شکل ۲-۵- نمونه یک واریوگرام که در آن hفاصله و $\gamma(h)$ واریانس فاصله یا تابع واریوگرام می‌باشد.$\sigma 1$ و$\sigma 2$ نشان‌دهنده ابعاد عمودی و افقی پدیده هیدروژئولوژیکی می‌باشند [۵]

کریجینگ نخستین بار در رابطه با ذخایر فلز به کار گرفته شد. این روش در درون‌یابی داده‌های قابلیت انتقال و بار هیدرولیکی نیز بارها به‌کار گرفته شده است. با این روش میتوان منحنی‌های درون‌یابی بارهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده را تهیه نمود و حاصل کار را در مرحله واسنجی مدل با منحنی‌های شبیه‌سازی شده مقایسه نمود.

نرم‌افزارهای گوناگونی برای آنالیزهای زمین آماری از جمله کریجینگ وجود دارند که از میان آنها می‌توان به GEOEASE[1] و GEOKRIG اشاره نمود. کریجینگ همچنین یکی از روش‌های درون‌یابی مورد استفاده‌ی برنامه SURFER برای تهیه نقشه‌های کنتوری می‌باشد [۵].

گذشته از این که از چه روشی برای تعریف مقادیر پارامترها در گره‌ها یا سلول‌ها استفاده شود، باید توجه داشت که پراکندگی داده‌ها باید از نظر هیدروژئولوژیکی منطقی بوده و مقادیر از نظر وضعیت زمین‌شناسی در محدوده قابل قبولی قرار داشته باشند. برای مثال اگر

1- Geostatistical Environmental Assessment Software

پس از یک عملیات درون‌یابی، نتیجه به صورت ارائه مقادیر هدایت هیدرولیکی نزدیک به هم برای دو محیط رسی و ماسه‌ای مجاور هم نشان داده شود، پیش از آن که علت خطا را در روش درون‌یابی دید، باید داده‌های صحرایی و روش برداشت آنها را کنترل نمود.

۲-۱۱- شرایط مرزی و شرایط اولیه

در این قسمت با معرفی شرایط مرزی و شرایط اولیه، مسایل مهم مربوط به تعیین این شرایط در هنگام شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی تشریح می‌شود.

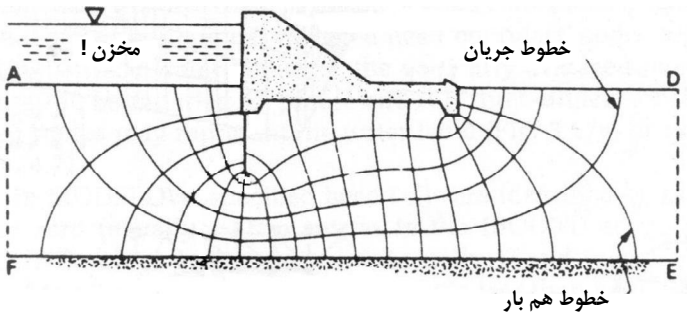
۲-۱۱-۱- شرایط مرزی

شرایط مرزی به محدودیت‌هایی گفته می‌شود که بر شبکه مدل اعمال می‌شود تا اندرکنش بین محدوده شبیه‌سازی و محیط اطراف مدل را نشان دهد و به کمک آن نتیجه تغییرات محیط بر روی محدوده مدل مشاهده می‌شود. انتخاب درست شرط مرزی یک گام حیاتی در طراحی مدل‌ها می‌باشد. وجود خطا در آن می‌تواند باعث ایجاد خطاهای قابل توجهی در نتایج شبیه‌سازی شود. انتخاب نوع شرط مرزی بستگی به مدل مفهومی، ویژگی‌های فیزیکی و نوع اطلاعات صحرایی موجود دارد. شرایط مرزی بسته به موقعیت‌شان در محدوده شبیه‌سازی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند [۵]:

الف- شرایط مرزی داخلی که در داخل محدوده مدل قرار می‌گیرند(همانند شرط مرزی چاه).

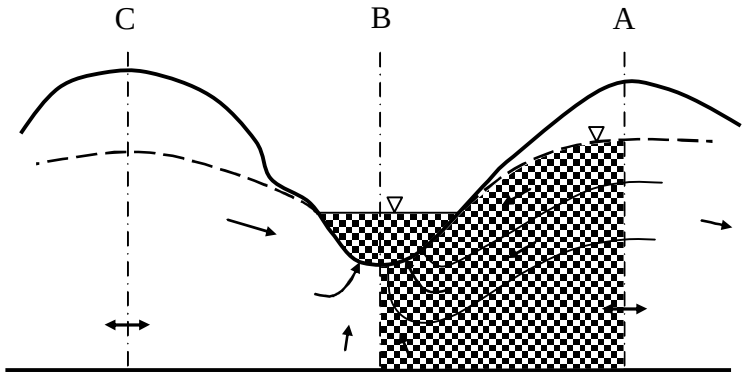
ب- شرایط مرزی خارجی که در مرز تقسیم و یا لبه محدوده شبیه‌سازی قرار می‌گیرند.

مرزهای خارجی خود به دو دسته کلی مرزهای هیدرولیکی و فیزیکی تقسیم می‌شوند. مرزهای فیزیکی آب‌های زیرزمینی در مناطقی که لایه‌های نفوذناپذیر و یا پهنه‌های وسیع آب‌های سطحی حضور دارند، به وجود می‌آید. در صورت نبود مرزهای فیزیکی مشخص، مرزها با توجه به شرایط هیدرولیکی موجود در نظر گرفته می‌شوند، مثلا در صورتی که در یک محل مقادیر بار هیدرولیکی و یا شار جریان از طریق اندازه‌گیری و یا تخمین، مشخص باشد می‌توان آن منطقه را به عنوان یک شرط مرزی هیدرولیکی در نظرگرفت. سه نوع شرط مرزی هیدرولیکی اصلی بار هیدرولیکی، جریان و جریان وابسته به بار هیدرولیکی در شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی وجود دارد که همه آنها را می‌توان به صورت ثابت و یا متغیر با زمان بر مرزها اعمال نمود. مرزهای هیدرولیکی شامل مرزهای باز محدوده سامانه و مرزهای خطوط جریان می‌باشد. در شکل (۲-۶) مرز AF به عنوان یک مرز هیدرولیکی معلوم تعیین می‌شود (مرز بدون جریان). چنین حالتی هنگامی رخ می‌دهد که فاصله مرز از پرده آب‌بند حداقل سه برابر عمق لایه نفوذپذیر باشد.



شکل ۲-۶- نمایش مرز AF به عنوان یک مرز بدون جریان در امتداد خطوط جریان

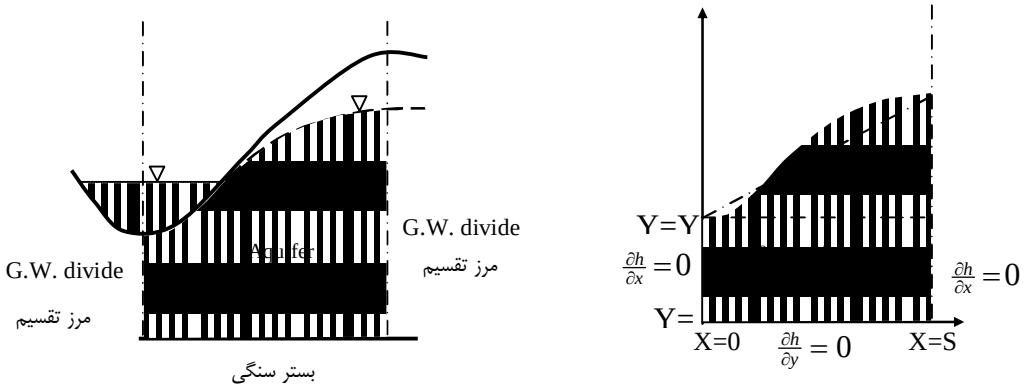
مثال دیگری که در این زمینه می‌توان مطرح کرد یک سامانه آب زیرزمینی است که در شکل (۲-۷) نمایش داده شده است.



شکل ۲-۷- نمایش مرز تقسیم و مرز بدون جریان در امتداد خطوط جریان

در شکل (۲-۷) در نقطهA آب به دو طرف جریان دارد که در واقع خط تقسیم آب زیرزمین می‌باشد. این محل را می‌توان مرز بدون جریان در نظر گرفت. این مرز اگر چه یک مرز غیر قابل نفوذ نیست ولی عملکرد آن همانند یک مرز نفوذناپذیر است. در مرزB نیز با توجه به اینکه مرز در امتداد خطوط جریان قرار می‌گیرد، یک مرز بدون جریان مثل یک مرز غیر قابل نفوذ می‌باشد. در شکل (۲-۸) شیب سطح آب به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود و به صورت تابع $h(x,y) = Cx + Y_o$ ارائه می‌شود.

با توجه به این‌که مرزهای هیدرولیکی می‌توانند از نظر محل و میزان تاثیر متغیر باشند، باید توجه بیش‌تری به آنها داشت. در حالی که شرایط فیزیکی دارای چنین پیچیدگی‌هایی نیست.



شکل ۲-۸- نمایش ریاضی مرزها

معمولا استفاده از شرایط مرزی فیزیکی با توجه به قطعیت در عملکرد آنها به شرایط مرزی هیدرولیکی ترجیح داده می‌شود، ولی در صورتی که امکان استفاده از مرزهای فیزیکی وجود نداشته باشد، استفاده از دیگر شرایط مرزی اجباری است. در صورتی که امکان اعمال شرایط فیزیکی نباشد، باید از شرایط هیدرولیکی که بر اساس وضعیت سامانه جریان قابل تعیین هستند، استفاده نمود. در انتخاب این شرایط مرزی باید دقت نمود تا در اثر اعمال شرایط مرزی، تفاوت آشکاری بین نتایج مدل و آن‌چه در طبیعت اتفاق می‌افتد به وجود نیاید.

از توصیه‌های مهم در تعیین محل اعمال شرایط مرزی این است که مرزهای مدل باید به اندازه کافی از مناطقی که تحت تاثیر تغییرات شدید شرایط هیدرولیکی هستند، دور باشند و تا حد امکان منطبق بر پدیده‌های فیزیکی انتخاب شوند. این احتیاط باعث می‌شود تغییرات ایجاد شده در شبکه داخلی تاثیر قابل توجهی بر روی مرزها نداشته باشد. همچنین در طراحی مرزها باید دقت نمود تا اثر ناشی از شرایط مرزی با واقعیت تطبیق داشته باشد.

۲-۱۱-۲- انواع اصلی شرایط مرزی

شرایط مرزی اصلی که در واقع شرایط مرزی خارجی مدل‌های آب زیرزمینی هستند، به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند:

نوع اول ـ شرط مرزی بار هیدرولیکی معلوم:

این نوع شرط مرزی در نهایی وجود دارد که تراز آب و یا بار هیدرولیکی مشخصی به صورت ثابت یا متغیر با زمان وجود داشته باشد. مثل نواحی ساحلی، دریاچه‌ها یا مخازن و رودخانه‌ها که دارای بار هیدرولیکی معلوم هستند.

در بحث مدل آب‌های زیرزمینی این نوع مرزها مرز با بار ثابت و یا مرز وابسته به بار هیدرولیکی خوانده می‌شوند. در بحث ریاضی، این نوع مرزها به نام‌های Dirichlet یاStable یا Essential خوانده می‌شوند.

نوع دوم ـ شرط مرزی جریان معلوم:

در این نوع شرط مرزی، مشتق بار هیدرولیکی که در واقع بده در واحد عرض جریان در مرز سامانه (امتداد عمود بر عرض) می‌باشد، دارای مقدار مشخصی است. مرز بدون جریان نیز یک نوع شرط مرزی جریان معلوم می‌باشد که در آن بده صفر در نظر گرفته می‌شود. چشمه‌ها، تبادل آب از طریق تبخیر، جریان‌های جانبی خروجی و ورودی و یا هر نوع منبع تغذیه و یا جذب جریان مثل آبخوان‌های مجاور یا چاه‌ها نیز از این نوع شرط مرزی هستند که البته در اکثر مدل‌ها جداگانه تعریف می‌شوند.

در مدل آب‌های زیرزمینی به این نوع مرزها مرز تغذیه گفته می‌شود. در بحث ریاضی، این نوع مرزها به نام‌های Unstable یا Nautural یا Neumen خوانده می‌شوند.

نوع سوم – شرط مرزی جریان وابسته به بار هیدرولیکی:

در این نوع شرط مرزی میزان بده عبوری در مرز با توجه به بار هیدرولیکی موجود در آن مرز طبق یک رابطه که می‌تواند توسط کاربر مشخص شود، تعیین می‌شود. به این نوع شرط مرزی، شرط مرزی مختلط نیز گفته می‌شود. رودخانه‌های نشتی یا زهکش‌ها و آبخوان‌های مجاورکه جریان تبادلی بین آنها با آبخوان اصلی وابسته به اختلاف بار هیدرولیکی است، جزو این دسته از شرایط مرزی قرار می‌گیرند. در بحث ریاضی، این نوع مرزها به نام‌های Cauchy یا Unstable یا Newton خوانده می‌شوند.

۲-۱۱-۳- تشخیص انواع شرایط مرزی

با توجه به مشخصه‌های موجود فیزیکی و هیدرولیکی موثر بر سامانه مورد مطالعه که در مدل مفهومی‌قابل مشاهده می‌باشد، می‌توان نوع شرط مرزی مناسب را انتخاب نمود.

لایه‌های سنگی نفوذناپذیر که معمولا مرز زیرین سامانه مدل را تشکیل می‌دهند، می‌توانند به عنوان مرز نفوذناپذیر مطرح شوند. برای آن‌که مرز بین دو محیط به عنوان یک شرط مرزی نفوذناپذیر فرض شود، لازم نیست حتما یک لایه سنگی وجود داشته باشد، بلکه کافی است اختلاف توانی ضرایب هدایت هیدرولیکی دو محیط در طرفین مرز حداقل ۲ باشد یا این‌که ضریب هدایت هیدرولیکی محیط داخل مرز حداقل صد برابر محیط خارجی باشد. این اختلاف ضریب هدایت هیدرولیکی باعث شکست امتداد خطوط جریان می‌شود. به نحوی که چنان‌چه جریان در لایه با ضریب هدایت بالاتر در امتداد افق باشد، امتداد جریان در لایه با ضریب هدایت پایین‌تر (نفوذناپذیرتر) به صورت قائم خواهد بود. همچنین اگر گرادیان هیدرولیکی در امتداد عرض یک مرز از محدوده مدل ناچیز باشد، آن مرز می‌تواند به عنوان یک مرز بدون جریان در نظر گرفته شود. در مورد تعیین محدوده مدل توصیه می‌شود که شبیه‌سازی جریان در لایه‌های با ضریب هدایت متفاوت در عمق تا محل وجود یک لایه نفوذناپذیر تحتانی ادامه پیدا کنند.

در صورتی که یک منبع با بار هیدرولیکی معلوم مثل یک رودخانه و یا دریاچه در مرز وجود داشته باشد، مرز را می‌توان به صورت مرز جریان با بار هیدرولیکی معلوم در نظر گرفت. باید در نظر داشت که انتخاب هر یک از این شرایط مرزی به این بستگی دارد که کدام یک از مقادیر جریان و یا بار هیدرولیکی مقدار مشخصی دارند.

ذخایر آب‌های سطحی گسترده را که مرتبط با آبخوان بوده و تلفات آب تاثیر قابل توجهی بر تراز سطح آب آنها ندارد، می‌توان در شبیه‌سازی به عنوان یک شرط مرزی بار هیدرولیکی معلوم در نظر گرفت.

برخی نواحی گسلی و مرز جداکننده آب‌های شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی را می‌توان به عنوان یک مرز بدون جریان در نظر گرفت. این مساله بستگی به میزان پخشیدگی جریان بین دو محیط دارد که خود وابسته به میزان شوری آب است.

در مورد رودخانه‌های نشتی که در محدوده مدل قرار می‌گیرند، با توجه به این‌که میزان جریان نفوذی از آنها بستگی به بار هیدرولیکی دارد می‌توان گفت این رودخانه‌ها یک شرط مرزی جریان وابسته به بار هیدرولیکی می‌باشند. در این حالت مقدار بده ناشی از نشت طبق معادله (۲-۲۳) به‌دست می‌آید.

$$\frac{Q_L}{A} = \frac{K'_Z}{b'}(h_{source} - h) \qquad (۲۳-۲)$$

که در معادله ۲-۲۳:

Q_L: بده حجمی $(m^3/m.s)$

A: سطح سلول (m^2)

hsource : بار هیدرولیکی منبع (دریاچه یا رودخانه) (m)

h : بار هیدرولیکی آبخوان در زیر منبع تغذیه (m)

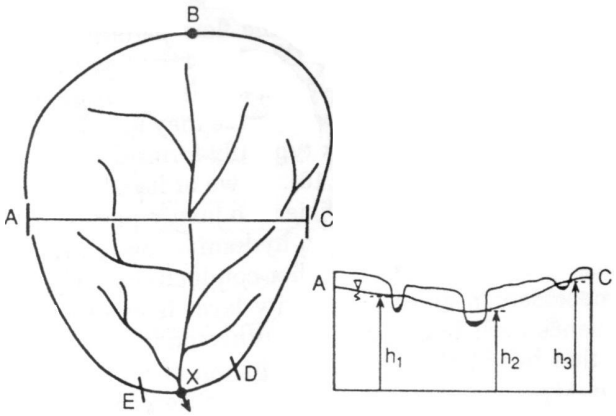
K'_Z : ضریب هدایت هیدرولیکی در امتداد قائم و بین منبع و آبخوان (m/s) و

b' : ضخامت لایه بین منبع تغذیه و آبخوان (m) می‌باشند.

مقادیر b'، K'_z و hsource را می‌توان از طریق اندازه‌گیری، محاسبه و یا تخمین، مشخص نمود.

زهکش‌ها نیز نوعی شرط مرزی جریان وابسته به بار هیدرولیکی هستند با این تفاوت که در این‌حالت جریان از داخل محیط به خارج اتفاق می‌افتد و به جایhsource تراز آب زهکش در معادله قرار می‌گیرد و جریان هنگامی‌به وجود می‌آید که h در معادله ۲-۲۳ از تراز زهکش بیش‌تر باشد. در این حالت K'_z و b' مشخصات فضای بین زهکش و آبخوان می‌باشند.

یک سامانه جریان معمولا هم شامل شرایط مرزی بار هیدرولیکی معلوم و هم شامل شرایط مرزی جریان معلوم می‌باشد. اما در برخی حالات، ممکن است کلیه شرایط مرزی به صورت جریان باشد و در واقع شرط مرزی بار هیدرولیکی به صورت مشخص وجود نداشته باشد. مثلا در شکل (۲-۹) که یک حوضه آب زیرزمینی نمایش داده شده است، مرز بدون جریان در کل مرز خارجی حوضه در محدوده EABCD وجود دارد و تنها در محدوده ED شرط مرزی جریان به شکل جریان زیرسطحی حوضه برقرار است.



شکل ۲-۹- محدوده EABCD مرز بدون جریان و محدوده ED شرط‌مرزی جریان

معمولا شرط مرزی بار هیدرولیکی نسبت به شرط مرزی جریان ترجیح داده می‌شود، زیرا اندازه‌گیری آن از اندازه‌گیری جریان راحت‌تر بوده و همچنین این شرط مرزی در هنگام واسنجی مناسب‌تر است.

۲-۱۱-٤- ایجاد مرزهای فرضی (مصنوعی) برای محدود کردن سامانه

در شبیه‌سازی گاهی می‌توان مرزهایی را یافت که به طور مشخص مرز جریان یا بار هیدرولیکی هستند مثل تراز آب یک دریاچه و یا یک لایه نفوذناپذیر که این مرزها، مرزهای واقعی سامانه هستند. اما گاهی در نظر گرفتن این مرزها مستلزم هزینه زیادی است. بنابراین مدل‌ساز باید مرزها را در محل دیگری انتخاب کند. در انتخاب محل مرزهایی که در مجاورت مرزهای واقعی سامانه قرار ندارند و در واقع برای محدود کردن ابعاد سامانه به وجود می‌آیند، دو گزینه را می‌توان در نظر گرفت:

- مرزهای دور (با فاصله غیرموثر):

هنگام شبیه‌سازی غیرماندگار بهتر است مرزها به قدری دور از مرکز مدل انتخاب شوند که اثر تنش‌های داخلی سامانه فرصت کافی برای رسیدن به مرزها را پیدا نکند. در این حالت فرض آن است که در مجاورت مرز بارهای هیدرولیکی و جریان در حین شبیه‌سازی تغییر نکند. به عنوان مثال بهتر است در شبیه‌سازی یک مخروط افت در اثر پمپاژ، قبل از اینکه اثر مخروط ایجاد شده در وسط سامانه به مرزها برسد، شبیه‌سازی تمام شود. به کمک حل تحلیلی در این مورد می‌توان زمان مورد نیاز برای این‌که مخروط ایجاد شده بر مرز اثر بگذارد، را تخمین زد. در چنین حالاتی برای بهینه کردن محاسبات در محدوده مورد نظر می‌توان سلول‌ها را خیلی ریز انتخاب کرد و در مناطق مرزی با توجه به عدم تغییرات قابل توجه، سلول را درشت در نظر گرفت.

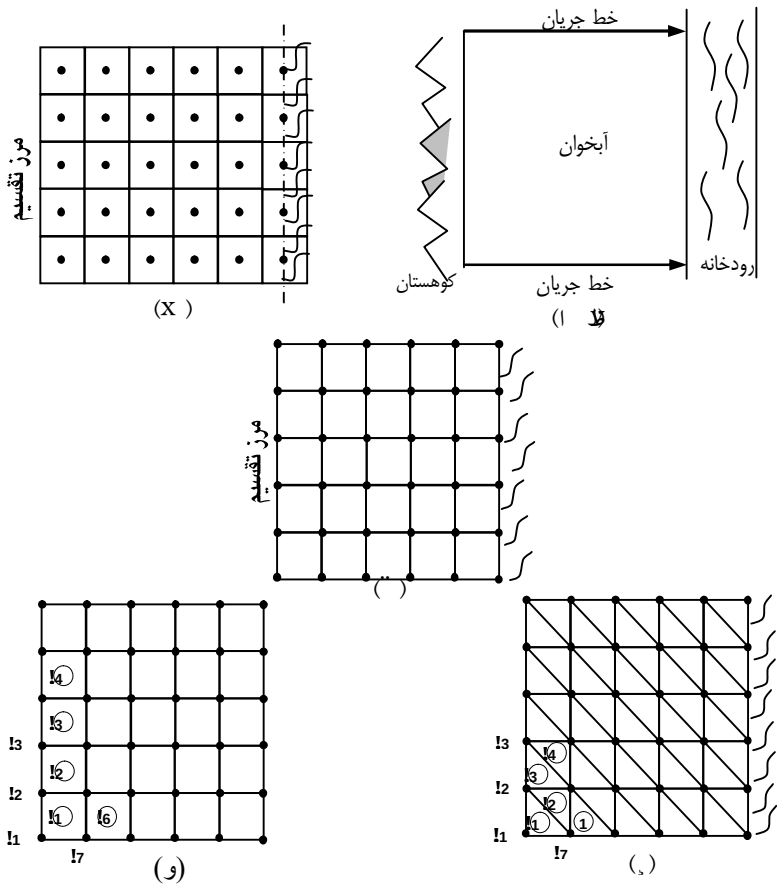
- مرزهای هیدرولیکی:

برای کوچک‌تر کردن محدوده شبیه‌سازی، می‌توان مرزهای هیدرولیکی را در مکانی غیر از محل واقعی آنها قرار داد. این شرط مرزی می‌تواند به صورت شرط مرزی بار هیدرولیکی معلوم و یا جریان معلوم باشد. مرزهایی که به این ترتیب انتخاب می‌شوند، معمولا مرزهای مصنوعی نام می‌گیرند.

۲-۱۱-۵- ارتباط شرط مرزی و روش محاسبات

شبیه‌سازی مرزها وابستگی شدیدی به نوع شبکه و روش عددی مورد استفاده دارد. در روش تفاضل‌های محدود با مبنای حجم کنترل، مرزهای با بارهیدرولیکی معلوم مستقیما بر روی مرکز حجم کنترل (نقاط) قرار می‌گیرند در حالی که مرزهای جریان در لبه خارجی حجم کنترل قرار می‌گیرد. در شکل (۲-۱۰) نحوه اعمال شرط مرزی در روش‌های مختلف عددی در یک مثال نشان‌داده شده است.

در روش‌های تفاضل محدود شرط مرزی جریان آب می‌تواند در قسمت بالایی حجم کنترل به صورت تغذیه آب زیرزمینی و یا به کناره‌های حجم کنترل به صورت جریان‌های زیرسطحی اعمال شود (شکل ۲-۱۱- الف). در مدل‌های اجزای محدود بده جریان به قسمتی از مرز که بین دو گره واقع است اختصاص می‌یابد (شکل ۲-۱۱- ب).



شکل ۲-۱۰- شبکه دو بعدی تفاضل‌های محدود و اجزا محدود

الف- محدوده مساله:

مرز بدون جریان در محدوده کوهستانی و در امتداد خطوط جریان در نظر گرفته می‌شود. رودخانه در ارتباط مستقیم با آبخوان بوده توسط آن تغذیه می‌شود و به عنوان یک شرط مرزی بار هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود.

ب- شبکه تفاضل‌های محدود بلوک- مرکز:

مرز بدون جریان در لبه بلوک‌ها در نظر گرفته شده. مرز رودخانه به عنوان مرز بار هیدرولیکی معلوم بر گره‌ها اعمال شده است. شبکه بزرگ‌تر از محدوده مدل در نظر گرفته شده است.

ج- شبکه تفاضل‌های محدود گره-مرکز:

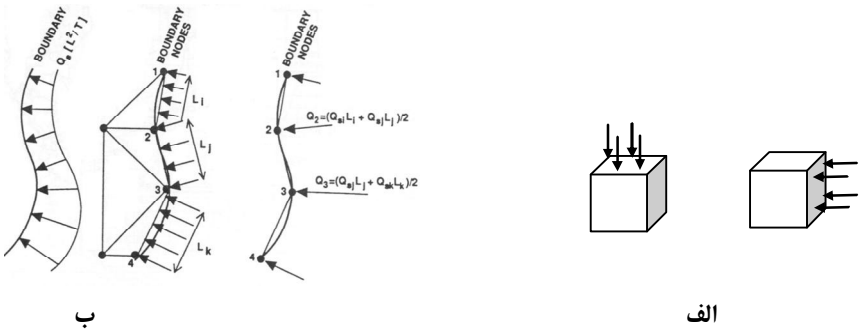
مرز بدون جریان و مرز بار هیدرولیکی هر دو بر گره‌ها اعمال می‌شود.

د- شبکه اجزا محدود مثلثی:

هر دو نوع شرط مرزی بر روی گره‌ها اعمال شده است.

هـ- شبکه اجزامحدود چهار ضلعی:

هر دو نوع شرط مرزی مستقیما بر روی گره‌ها اعمال شده است.



الف – در مدل‌های تفاضل محدود ب – در مدل‌های اجزای محدود

شکل ۲-۱۱- نحوه اعمال شرط مرزی جریان

۲-۱۱-٦- شرایط اولیه

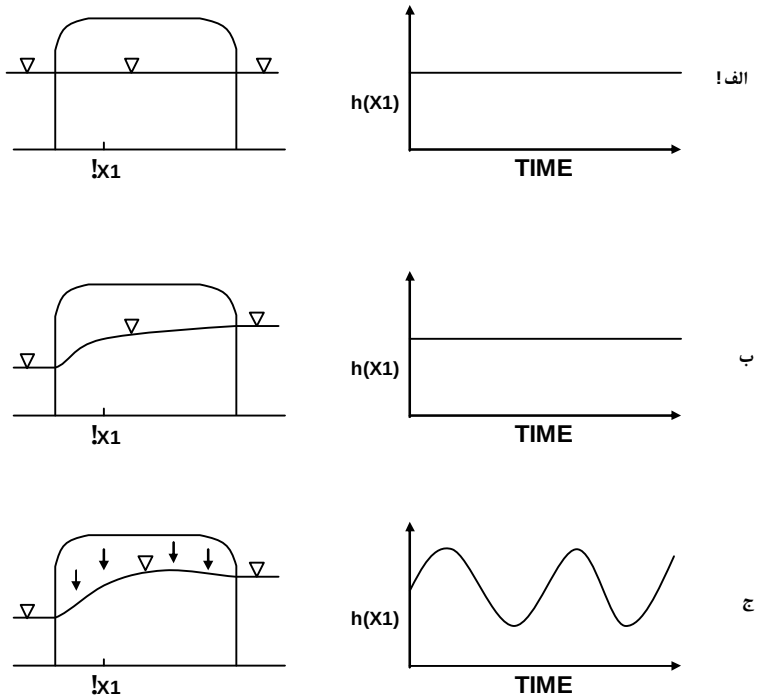
منظور از شرایط اولیه مقادیر متغیرهای مجهول درون محدوده مدل (مانند بارهیدرولیکی و جریان) در لحظه ابتدایی شبیه‌سازی می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های غیرماندگار لازم است شرایط اولیه مشخص باشد. معمولا مدل برای یک حالت ماندگار واسنجی شده و نتایج آن به عنوان شرایط اولیه در شبیه‌سازی غیرماندگار مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک شیوه مناسب دیگر در تعیین شرایط اولیه استفاده از داده‌های صحرایی می‌باشد. استفاده از مدل برای تولید مقادیر بار هیدرولیکی باعث سازگاری شرایط اولیه، شرایط مرزی هیدرولوژیکی و پارامترهای مربوط به مدل می‌شود. در صورتی که اگر از مقادیر اندازه‌گیری شده صحرایی به عنوان مقادیر اولیه استفاده شود، در گام‌های زمانی اولیه مدل تنها به شرایط مرزی اعمال شده عکس‌العمل نشان نمی‌دهد، بلکه مدتی را صرف تعدیل

توزیع بارهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده می‌کند به گونه‌ای که بین داده‌های هیدرولوژیکی مدل و پارامترهای آن با مقادیر اولیه بار هیدرولیکی تعادل برقرار شود. این مرحله اصطلاحا گرم شدن مدل نامیده می‌شود.

دو نوع شرایط اولیه به صورت ماندگار می‌تواند، مورد استفاده قرار گیرد که عبارت از شرایط ماندگار ساکن و شرایط ماندگار شبه دینامیک می‌باشد.

در شرایط ماندگار ساکن، بار هیدرولیکی در کل محدوده مدل ثابت بوده و هیچ جریانی در سامانه وجود ندارد (شکل ۲-۱۲-الف). حالت ماندگار ساکن برای شبیه‌سازی افت آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این معنی که مثلا برای شبیه‌سازی افت بار هیدرولیکی ناشی از پمپاژ آب از یک نقطه، شرایط اولیه در آن محدوده شرایط ماندگار ساکن در نظر گرفته می‌شود.

این نوع شرایط اولیه (ماندگار ساکن) نمی‌تواند بین جریان‌های اصلی که در اثر گرادیان بار هیدرولیکی به وجود می‌آیند، رابطه‌ای برقرار نماید. به این دلیل ممکن است در بعضی شبیه‌سازی‌ها مناسب نباشد. اغلب برنامه‌های محاسباتی مثل MODFLOW و یا AQUIFEM-1 محاسبات را بر پایه توزیع بار هیدرولیکی اولیه که توسط کاربر تعیین شده است انجام می‌دهند.



الف- ماندگار ساکن، ب- نیمه دینامیک، ج- دینامیک دوره‌ای

شکل۲-۱۲- نمایش شماتیک شرط اولیه

معمولا توزیع بار هیدرولیکی پیش از شبیه‌سازی‌های غیرماندگار به وسیله شبیه‌سازی ماندگار تعیین می‌شود. نتیجه این عمل ایجاد شرایط ماندگار شبه دینامیک است(شکل ۲-۱۲-ب). تحت این شرایط بار هیدرولیکی می‌تواند به صورت مکانی متغیر باشد و جریان ورودی و خروجی سامانه مقدار یکسانی دارند، ولی باز هم تغییرات زمانی برای جریان و بار هیدرولیکی وجود ندارد. اغلب شبیه‌سازی‌ها بر پایه این نوع شرایط اولیه انجام می‌شود.

نوع دیگری از شرایط اولیه وجود دارد که با دو نوع بالا متفاوت می‌باشد. این نوع شرایط اولیه که قابل استفاده در شبیه‌سازی‌های ناماندگار می‌باشد، شرایط دینامیک دوره‌ای نامیده می‌شود (شکل ۲-۱۲-ج). این شرایط دارای یک سری بارهای هیدرولیکی است که در اثر نوسانات دوره‌ای سطح آب به وجود می‌آیند. به عنوان مثال اگر یک دوره که نوسانات ماهانه بار هیدرولیکی را نشان می‌دهد برای سری‌های میانگین سالانه موجود باشد، با توجه به تشابه همه سال‌ها، هر دوره شامل یک سری یکسان از مقادیر بار هیدرولیکی خواهد بود به شکلی که هر یک ماه خاص در سال‌های متوالی مقدار تقریبا یکسانی دارد. همانطور که مشخص است شرایط اولیه با توجه به این‌که بار هیدرولیکی به صورت ماهانه متغیر است دینامیک می‌باشد. از طرفی شرایط آغازین یک نوع شرایط ماندگار است، چرا که هر دوره سالانه به طور کلی ماندگار باقی می‌ماند.

این نوع شرایط اولیه می‌تواند از طریق اجرای مدل با یک سری ورودی‌های دوره‌ای (مثلا نرخ تغذیه متوسط ماهانه) تولید شود. این روند محاسبات تا هنگام دست‌یابی به یک الگوی دوره‌ای منظم، ادامه می‌یابد. تولید شرایط اولیه دوره‌ای دینامیک نیاز به شبیه‌سازی غیرماندگار دارد و در این بین حتما باید مدل برای یک آبنمود مشاهده شده واسنجی شود.

در محاسبات غیرماندگار، یک روش دیگر نیز می‌تواند برای تعیین مقادیر اولیه متغیرها به عنوان شرایط اولیه استفاده شود و آن استفاده از یک توزیع دلخواه و سپس اجرای مدل غیرماندگار می‌باشد. نتایج مدل غیرماندگار هنگامی به عنوان شرایط اولیه قابل قبول خواهد بود که با نتایج اندازه‌گیری شده همساز شود. سپس این نتایج می‌تواند به عنوان شرایط اولیه در شبیه‌سازی‌ها جهت پیش‌بینی نتیجه مورد نظر در مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۱۲- واسنجی مدل در شرایط ماندگار و غیرماندگار

هر مدلی که برای شناخت و پیش‌بینی رفتار یک سامانه آب زیرزمینی انتخاب می‌شود، باید به خوبی تعریف شود. این تعریف باید مبتنی بر وضعیت هندسی دقیق لایه آبدار یا سامانه مورد مطالعه اطلاعاتی درباره پارامترهای فیزیکی آن مرزها، ورودی‌ها و خروجی‌های آن باشد. تمام این اطلاعات باید از مدل مفهومی سامانه که بر اساس مطالعات صحرایی آزمایشگاهی و دفتری تهیه شده است، به‌دست آید. چنان‌چه اطلاعات مذکور در دسترس نباشد باید بر اساس تجربه و شناخت سامانه حدس زده شوند و سپس در طی فرآیند واسنجی اصلاح شوند. پس عمل واسنجی مدل در واقع انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده شده مربوط به رفتار سامانه آبخوان (از قبیل بار هیدرولیکی پمپاژ و تغذیه) در گذشته است.

واسنجی مدل به دو شیوه امکان‌پذیر است. یا می‌تواند به روش سعی و خطا[1] باشد و یا به روش خودکار توسط نرم افزارهای مربوطه انجام شود[۱۱]. از معایب واسنجی به روش سعی و خطا وقت‌گیر بودن آن است ولی از مزایای آن این است که اگر توام با تطبیق با واقعیت باشد آنگاه اطمینان به پارامترهای واسنجی شده از درصد بالایی برخوردار خواهد بود.

اولین مرحله در واسنجی مدل تعیین مقدار واسنجی می‌باشد. این مقدار عبارت از مقدار مشاهده شده است که می‌تواند بار هیدرولیکی جریان یا شار هیدرولیکی و یا بیلان آب زیرزمینی باشد. مهم‌ترین و ساده‌ترین نوع مقدار واسنجی را تراز سطح آب زیرزمینی تشکیل می‌دهد. چون اندازه‌گیری آن ساده‌تر بوده و با خطای کم‌تری همراه است و نیز واسنجی آن راحت‌تر می‌باشد.

1-Trail & error

دومین مرحله در واسنجی مدل تعیین اهداف واسنجی است که شامل نوع مقدار واسنجی و خطای مربوط به آن می‌باشد. خطای واسنجی یا معیار خطا بستگی به نوع مقدار واسنجی دارد. اگر بار هیدرولیکی به عنوان مقدار واسنجی انتخاب شود، خطای آن در حد چند متر و کم‌تر از آن منظور می‌شود. ولی اگر جریان هیدرولیکی یا بیلان آب به عنوان مقدار واسنجی انتخاب شود خطای آن باید در حدکم‌تر از یک یا چند میلیون متر مکعب در سال باشد. البته لازم است که تمام موارد ذکر شده مدنظر قرار گیرند زیرا ممکن است در یک فرآیند مدل‌سازی در حین واسنجی به دسته جواب‌هایی دست یافت که بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده بر هم منطبق شوند، ولی میزان جریان ورودی و خروجی از مرزها و بیلان آب در مدل با واقعیت منطبق نباشد.

در روش سعی و خطا جهت واسنجی، مدل باید با مرحله آنالیز باقیمانده‌ها توام باشد (آنالیز باقیمانده‌ها عبارت است از محاسبه اختلاف بین پارامترها یا متغیر شبیه‌سازی شده و مقدار مشاهده شده آن و تجزیه و تحلیل اختلاف موجود). آنالیز باقیمانده‌ها باید بر اساس یک سری محاسبات آماری صورت پذیرد. هر چقدر این اختلاف کوچک‌تر شود نشان دهنده انطباق و دست‌یابی بیش‌تر به اهداف واسنجی است. ولی در عمل به حداقل رساندن این اختلاف در تمام سلول‌های شبکه تقریبا غیرممکن است. معیارهای آماری متعددی از قبیل میانگین خطا میانگین قدر مطلق خطا و جذر میانگین مربعات خطا وجود دارد که می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

به منظور بررسی چگونگی میزان واسنجی پارامتر موردنظر در بخش‌های مختلف شبکه برای تشخیص این‌که کدام بخش‌ها از مدل با واسنجی ضعیف و کدام بخش‌ها با واسنجی قوی همراه بوده‌اند، می‌توان سطح واسنجی و توزیع خطا را بررسی نمود. برای این منظور می‌توان سطح واسنجی را بسته به میزان واسنجی نمایش داد.

در پایان مرحله واسنجی سامانه تحت بررسی دارای مدلی خواهد بود که تمام پارامترهای آن به خوبی تعریف شده‌اند و اکنون می‌توان با اطمینان از آن برای پیش‌بینی رفتار آبخوان در آینده استفاده نمود. البته نباید انتظار داشت که مدل واسنجی شده همواره پاسخ منطبق بر واقعیت را نتیجه دهد، بلکه باید تفاوت‌هایی را انتظار داشت. این موضوع ناشی از آن است که برای رسیدن به مدل یک سامانه واقعی فرضیات متعددی در نظر گرفته می‌شود. به منظور کاهش این تفاوت‌ها باید،

الف) مدل ساخته شده تا حد امکان به سامانه شبیه‌سازی شده نزدیک‌تر باشد و

ب) از حداکثر داده‌های واقعی در عمل واسنجی استفاده شود.

در صورتی که معادله حاکم بر سامانه مورد مطالعه به صورت رابطه (۲-۲۴) باشد،

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_y \frac{\partial h}{\partial y}) + N(x,y,t) + R(x,y,t) - P(x,y,t) = S\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۲۴-۲)$$

(که R N و P به ترتیب مقدار تغذیه طبیعی تغذیه مصنوعی و پمپاژ می‌باشد) به منظور استفاده از این معادلـه برای پیش‌بینی رفتـــار سامانه لازم است پارامترهای $Tx(x\ y)$، $T_y(x\ y)$، $S(x\ y)$ و $N(x\ y\ t)$ شناختـه شده باشنـد تا بتـــوان آن را برای پاسـخ نامعلـوم سامانه $h(x\ y\ t)$ نسبت به مقادیر معلوم $R(x\ y\ t)$ و $P(x\ y\ t)$ حل نمود. در صورتی که در روش واسنجی یا مساله معکوس مقادیر $h(x\ y\ t)$، $R(x\ y\ t)$ و $P(x\ y\ t)$ برای دوره زمانی در گذشته شناخته می‌باشند و آن‌چه که جستجو می‌شود، مقادیری برای پارامترهای $Tx(x\ y)$، $T_y(x\ y)$، $S(x\ y)$ و $N(x\ y\ t)$ می‌باشد تا بتوان از مدل در حل مساله کمک گرفت.

آزمون پمپاژ یکی از روش‌های متعددی است که می‌توان از آن برای تعیین پارامترهای مدل استفاده نمود. در هنگام عدم دسترسی به داده‌ها از راه‌های دیگر نتایج آزمون‌های پمپاژ می‌توانند در مدل‌های ناحیه‌ای به منظور پیش‌بینی رفتار یک آبخوان مورد استفاده قرار گیرند.

همان‌گونه که مطرح شد یکی از روش‌های واسنجی مدل روش واسنجی خودکار می‌باشد. نرم افزار PEST یکی از نرم‌افزارهایی است که برای واسنجی خودکار یک مدل تهیه شده است. در واسنجی خودکار عمل واسنجی مدل به دو طریق مستقیم و یا غیرمستقیم صورت می‌گیرد. در روش مستقیم پارامترهای مجهول (به عنوان مثال بار هیدرولیکی) به صورت یک متغیر مستقل رفتار می‌نماید، بدین صورت که باید مقدار بار هیدرولیکی که مجهول می‌باشد برای تمام گره‌ها تعریف شود. در صورتی که روش غیرمستقیم مشابه با روش سعی و خطا عمل می‌نماید که مساله به صورت پیش‌رو به طور تکراری حل می‌شود.

یکی از مشکلات موجود در واسنجی مدل‌ها، مشکل تعدد پاسخ‌ها می‌باشد. به این معنی که مجموعه‌های مختلفی از مقادیر پارامترها ممکن است باعث نتایج یکسانی شوند. به این ترتیب هر ترکیبی از نرخ جریان و هدایت هیدرولیکی (k) در مدل که دارای نسبتی مشابه با نسبت نرخ جریان به هدایت هیدرولیکی واقعی باشد، می‌تواند نتایج تقریبا یکسانی را ایجاد نماید. برای حل این مشکل روش‌های مختلفی توسط محققین پیشنهاد شده است.

مجموعه داده‌هایی که برای واسنجی مدل در حالت غیرماندگار استفاده می‌شوند، شامل داده‌های آزمایش پمپاژ و یا داده‌های چندین ساله بار هیدرولیکی که تغییرات و نوسانات فصلی را دربرمی‌گیرند، می‌باشد. همچنین معمولا مدل‌ها ابتدا برای شرایط ماندگار واسنجی می‌شوند، سپس نتایج حاصل از واسنجی ماندگار به عنوان مقادیر اولیه در شبیه‌سازی مدل در حالت غیرماندگار به کار می‌روند. یا اینکه مقادیر بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده به عنوان شرایط اولیه در مدل غیرماندگار وارد می‌شوند. باید در نظر داشت که در حالت اول یعنی در حالتی که مقادیر حاصل از واسنجی ماندگار به عنوان مقادیر اولیه در مدل غیرماندگار وارد می‌شوند، الزاما شرایط واقعی سامانه در نظر گرفته نمی‌شود، هرچند این روش به عنوان یک روش قابل قبول در مدل‌سازی مطرح می‌باشد.

۲-۱۳- انتخاب دوره تنش و گام زمانی مناسب

۲-۱۳-۱- انتخاب دوره تنش مناسب جهت واسنجی مدل

در مدل‌های آب‌های زیرزمینی دو نوع فاصله زمانی استفاده می‌شود:

- دوره تنش[1]
- گام زمانی[2]

تعریف و انتخاب دوره‌های تنش می‌تواند بسیار پیچیده باشد چون شرایط هیدرولوژیک از قبیل بارش جریان رودخانه‌ها و رژیم‌های پمپاژ می‌توانند، رفتاری کاملا مستقل از یکدیگر داشته باشند. این رفتارها می‌تواند باعث پیچیدگی در پردازش داده‌ها برای ورود به مدل شوند.

انتخاب دوره‌های تنش ماهانه با در نظر گرفتن متوسط مقدار نرخ تنش‌ها به عنوان یک دوره مناسب می‌باشد. اگرچه ممکن است که دوره‌های تنش ماهانه باعث ایجاد مشکلاتی در مقایسه با داده‌های واسنجی شده شود.

1-Sterss period
2-Time step

در اغلب موارد می‌توان برای انواع مختلف تنش‌ها دوره‌های تنش مجزا انتخاب نمود. همچنین می‌توان برای ایجاد گام‌های زمانی از بلوک‌های زمانی با مدت زمان‌های متفاوت استفاده نمود. این بلوک‌های زمانی کوچک‌تر در نرم افزار Modflow به نام دوره‌های تنش و در نرم افزار PLASM به نام withdrawal rate schedules معرفی شده‌اند.

۲-۱۳-۲- انتخاب گام زمانی مناسب با توجه به نوع مساله و مدل انتخاب شده

در این قسمت به نحوه انتخاب گام زمانی در انواع روش‌های عددی مورد استفاده در مدل‌های آب‌های زیرزمینی پرداخته می‌شود. عموما انتخاب گام زمانی به روش عددی مورد استفاده یا به‌عبارت مناسب‌تر روش گسسته‌سازی معادلات حاکم بر پدیده بر می‌گردد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شده است، روش‌های عددی معمول برای تقریب عددی معادلات حاکم بر آب‌های زیرزمینی عبارت از روش تفاضل‌های محدود و روش اجزای محدود می‌باشند.

۲-۱۳-۳- روش تفاضل‌های محدود

در معادله گسسته شده حرکت آب‌های زیرزمینی به روش تفاضل‌های محدود به سه حالت می‌توان پارامترها را از نظر سطح زمانی تعریف نمود:

الف- حالت صریح[۱]

ب- حالت غیر صریح یا ضمن[۲]

ج- حالت نیمه صریح[۳]

در هر یک از حالت‌های بالا روش انتخاب گام زمانی متفاوت بوده و تابع شرایط و ضوابط خاص خود می‌باشد که در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود.

الف- حالت صریح

در حالت صریح سطح زمانی انتخابی برای پارامترها سطح زمانی فعلی (n) خواهد بود. به عبارت دیگر در معادله حرکت آب های زیرزمینی کلیه مقادیر در سطح زمانی معلوم تعریف می‌گردند. در نتیجه در معادله حرکت آب های زیرزمینی فقط یک مجهول باقی می‌ماند که به راحتی به‌دست می‌آید. حالت صریح ساده‌ترین روش حل با استفاده از روش تفاضل‌های محدود می‌باشد.

مساله مهم در این روش بررسی شرط پایداری می‌باشد. برای بررسی شرط پایداری در معادله حرکت آب‌های زیرزمینی معادله به صورت ساده شده زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$h_{i,j}^{n+1} = (1-\frac{4T\Delta t}{Sa^2})h_{i,j}^{n} + (\frac{4T\Delta t}{Sa^2})(\frac{h^{n}_{i+1,j} + h^{n}_{i-1,j} + h^{n}_{i,j+1} + h^{n}_{i-j,1}}{4}) + \frac{R^{n}_{i,j}\Delta t}{S} \qquad (۲۵-۲)$$

که د ر آن:

1-Explicit
2-Implicit
3-Semi-implicit

h : بار هیدرولیکی

t : زمان

S : ضریب ذخیره

T : ضریب قابلیت انتقال

A : طول و عرض هر سلول

شرط پایداری در روش صریح را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

(۲-۲۶) برای جریان دوبعدی $\Delta t \le \frac{0.25S\ a^2}{T}$

(۲-۲۷) برای جریان یک بعدی $\Delta t \le \frac{0.5S\ a^2}{T}$

در نتیجه انتخاب گام زمانی در حالت صریح از روش تفاضل‌های محدود باید به گونه‌ای باشد که شرط فوق برقرار شود. اگر $\Delta X \neq \Delta Y$ شرط پایداری به ترتیب زیر خواهد بود:

(۲-۲۸) برای جریان یک بعدی $(\frac{T}{4})(\frac{\Delta t}{\Delta X^2}+\frac{\Delta t}{\Delta Y^2}) \le 0.25$

(۲-۲۹) برای جریان دو بعدی $(\frac{T}{4})(\frac{\Delta t}{\Delta X^2}+\frac{\Delta t}{\Delta Y^2}) \le 0.5$

نتیجه عملی این شرط این است که گام زمانی باید بسیار کوچک در نظر گرفته شود تا جواب به دست آمده پایدار باشد.

ب- حالت غیر صریح

در این حالت سطح زمانی انتخابی برای پارامترها سطح زمانی آینده $(n+1)$ خواهد بود. به عبارت دیگر در معادله حرکت آب‌های زیرزمینی کلیه مقادیر در سطح زمانی مجهول تعریف می‌شوند. از آنجا که در این حالت معادله حاکم در هر گره از شبکه‌بندی دارای پنج مجهول می‌باشد، بنابراین حل معادله به سهولت حالت قبل نیست و یک سامانه معادلات همزمان باید حل شود.

بررسی شرط پایداری در این حالت نشان داده است که روش غیر صریح بدون قید و شرط پایدار می‌باشد و در نتیجه برای انتخاب گام زمانی در این روش شرطی وجود ندارد. ذکر این نکته ضروری است که در این حالت دقت حل عددی به مقدار در نظر گرفته شده برای گام زمانی(Δt) ، فواصل مکانی (Δx وΔy) و همچنین اطلاعات قابل دسترس برای گام‌های انتخابی بستگی دارد و مقدار مناسب را در این حالت باید از آنالیز حساسیت به‌دست آورد.

ج- حالت نیمه صریح

در این حالت برای بیان بار هیدرولیکی در معادلات حاکم از ترکیبی از دو حالت صریح و غیر صریح به صورت زیر استفاده می‌شود:

(۲-۳۰) $h = \propto h^n + (1-\propto)h^{n+1}$

که در آن:

h : بار هیدرولیکی

n : سطح زمانی

$\propto$: ضریب وزن (در حالت نیمه‌صریح برابر با ۰/۵می‌باشد)

رابطه بالا در صورتی که $\propto$ برابر با صفر باشد برای حالت غیر صریح و چنان‌چه $\propto$ برابر با ۱ باشد، برای حالت صریح می‌باشد. در این روش نیز مانند غیر صریح در هر معادله گسسته شده برای هر گره از شبکه‌بندی پنج مجهول وجود دارد که همانند حالت غیر صریح می‌توان مساله را حل نمود. تفاوت این روش با روش غیر صریح این است که در این روش باید پایداری کنترل شود. کنترل روش پایداری مساله در قسمتهای دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱۳-٤- روش اجزای محدود

روش‌های اجزای محدود نیز می‌توانند به صورت صریح و ضمنی مورد استفاده قرار گیرند که روش صریح معمولا کم‌تر به‌کار می‌آید. بنابراین معمولا با توجه به ضمنی بودن روش حل، پایدار بودن روش، عموما قید و شرطی برای انتخاب گام زمانی ایجاد نمی‌کند و دقت حل عددی کنترل کننده‌ی مقدار گام زمانی است. لذا با آنالیز حساسیت باید گام زمانی به گونه‌ای انتخاب شود که مقادیر کوچک‌تر از آن در نتایج تاثیر چندانی نداشته باشد.

۲-۱۳-۵- تغییرات گام زمانی در طول محاسبات

گام زمانی را در طول محاسبات می‌توان به دو صورت در نظر گرفت:

الف- ثابت

ب- متغیر

در حالتی که گام زمانی به صورت ثابت در نظر گرفته شود، در طول محاسبات مقدار آن تغییر نمی‌کند که معمولا برای مدل‌سازی از این حالت استفاده می‌کنند.

در گام زمانی متغیر، مقدار گام زمانی در طول مدل‌سازی تغییر می‌کند که ممکن است، افزاینده باشد. با استفاده از گام زمانی متغیر، زمان تخصیص یافته برای انجام محاسبات توسط کامپیوتر کاهش می‌یابد. معمولا از این حالت در مواقعی استفاده می‌شود که نتایج محاسبات در زمان‌های به خصوصی با اهمیت بوده و نتایج حاصل در تمام محاسبات مورد نظر نیست. برای مثال، در شبیه‌سازی مخروط افت در پیرامون چاه پمپاژ در زمان‌های اولیه پمپاژ که افت قابل توجه است، Δt کوچک‌تر و در زمان‌های بعد که افت آهسته صورت می‌گیرد، Δt بزرگ‌تر گرفته می‌شود. در استفاده از گام زمانی متغیر، برای بررسی دقت محاسبات باید از آنالیز حساسیت استفاده نمود.

۲-۱٤- اعمال عوامل تغذیه و تخلیه در شبکه و در هرگام زمانی

آب ورودی به سامانه آب زیرزمینی تغذیه و آب خروجی از آن تخلیه خوانده می‌شود. تغذیه و تخلیه از عوامل بسیار مهم و موثر در مدل‌سازی آب زیرزمینی می‌باشد. تخلیه می‌تواند به صورت طبیعی (نظیر چشمه‌ها و زهکش‌ها) و یا آبی که از آبخوان به آبخوان‌های مجاور یا به دریا و دریاچه وارد می‌شود، باشد. تخلیه مصنوعی آبخوان نیز ممکن است از طریق چاه‌ها، قنات‌ها و زهکش‌ها انجام شود. تغذیه نیز می‌تواند به صورت طبیعی از طریق نفوذ آب باران، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن و نیز آب برگشتی آبیاری به لایه آبخوان باشد یا به صورت تغذیه مصنوعی توسط چاه‌های تزریق و حوضچه‌های تغذیه انجام شود. در هر حال برای مدل‌سازی آب زیرزمینی در یک منطقه لازم است کلیه منابع تغذیه و تخلیه موجود در آن محل مشخص و به دقت مورد بررسی قرار گیرند.

۲-۱۴-۱- تغذیه و تخلیه در سامانه آب زیرزمینی

در یک مدل ممکن است آب به دو طریق به سامانه وارد یا از آن خارج شود:

الف ـ از طریق مرزها که توسط شرایط مرزی برای مدل تعریف می‌شود.

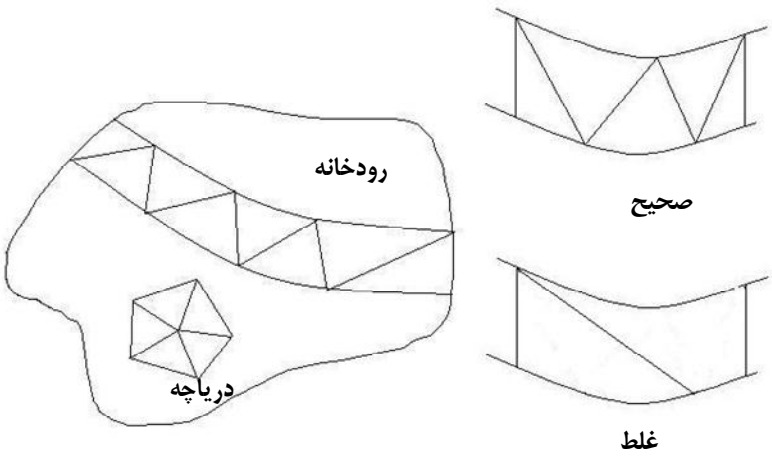
ب ـ از طریق تغذیه و تخلیه‌ای که در داخل شبکه صورت می‌گیرد.

همه عواملی که برای شبیه‌سازی شرایط مرزی استفاده می‌شوند، می‌توانند در داخل دامنه حل مساله، برای شبیه‌سازی تغذیه یا تخلیه آب یا مرزهای داخلی نیز مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال، شرایط وابسته به بار هیدرولیکی ممکن است برای شبیه‌سازی رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و زهکش‌های موجود در داخل شبکه به کار روند. در این فصل، تغذیه و تخلیه‌های داخلی مورد بررسی قرار گرفته است.

عوامل انتخابی مدل که برای نشان دادن تغذیه و تخلیه‌های مرزی استفاده شدند که برای نشان دادن تغذیه و تخلیه‌های درونی نیز به کار می‌روند. برای مثال، در مدل‌های تفاضل محدود جریان‌های مرزی به صورت چاه‌های پمپاژ یا چاه‌های تزریقی که در طول مرز قرار داده می‌شوند، تعریف می‌شود و البته باید به‌خاطر داشت که تغذیه و تخلیه های درونی جز شرایط مرزی نیستند.

واضح است که تغذیه در داخل یک شبکه شرط مرزی نیست، اما گاهی اوقات ممکن است در اثر اشتباه یا عدم دقت، انواع دیگری از تغذیه و تخلیه‌های درونی در نظر گرفته شود. برای مثال تغذیه آب زیرزمینی و تزریق آب به لایه آبدار، در برخی از مدل‌های نیم‌رخ و کاملا سه‌بعدی، یک شرط مرزی به حساب می‌آید در حالی‌که در مدل‌های دوبعدی سطحی و نیز در مدل‌های شبه‌سه‌بعدی و نیم‌رخ که در آنها از فرض دوپویی برای شبیه‌سازی جریان در لایه بالایی مدل استفاده شده است، یک مولفه‌ی تغذیه می‌باشد.

گره‌های بار هیدرولیکی مشخص معمولا برای نشان دادن شرایط مرزی بار هیدرولیکی مشخص استفاده می‌شود، اما ممکن است این گره‌های تعریف شده، جهت نشان دادن دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، زهکش‌ها یا انواع دیگری از تغذیه و تخلیه در درون شبکه نیز استفاده شوند (شکل ۲ – ۱۳).



شکل ۲-۱۳- گره‌های بار هیدرولیکی تعریف شده جهت نشان دادن رودخانه و دریاچه در داخل شبکه اجزای محدود دوبعدیو نمایش روش صحیح شبکه‌بندی آنها

۲-۱۴-۲- چاه‌های پمپاژ و تزریق

چاه‌های پمپاژ و تزریق در مدل به صورت منابع تخلیه و تغذیه‌ی نقطه‌ای بوده و با استفاده از یک گره نشان داده می‌شود. نرخ پمپاژ یا تزریق بر حسب واحد حجم آب در زمان برای هر گره تعریف می‌شود. در یک مدل کاملا سه‌بعدی، گره برای نشان دادن یک نقطه از فضا است. اما در یک مدل شبه سه‌بعدی یا مدل دو بعدی سطحی، گره ضخامت لایه آبدار را نیز نشان می‌دهد. بنابراین در این مدل‌ها فرض می‌شود که چاه در کل ضخامت لایه آبدار نفوذ می‌کند. شبیه‌سازی پمپاژ یا تزریق در یک مدل نیم‌رخ به سادگی صورت نمی‌گیرد، زیرا جریان شعاعی به چاه در یک مدل نیم‌رخ معمولی امکان‌پذیر نیست.

۲-۱۴-۳- تغذیه و تخلیه در مدل‌های تفاضل محدود

در مدل‌های تفاضل محدود، گره معرف سلول می‌باشد. بنابراین چشمه و چاه‌هایی که آب را به لایه آبخوان تزریق و یا از آن خارج می‌کنند، با سلولی که شامل نقطه تغذیه یا تخلیه است نمایش داده می‌شود.

در شبکه مدل‌سازی منطقه، قطر یک چاه معمولا خیلی کوچک‌تر از ابعاد سلول می‌باشد. جهت نشان دادن دقیق‌تر اثرات تغذیه نقطه‌ای، بهتر است اندازه‌ی سلول‌ها در نزدیکی چاه کوچک باشد اما در مدل‌سازی واقعی منطقه عموما به سلول‌های درشت نیاز می‌باشد و به‌ندرت می‌توان سلول‌ها را کوچک‌تر از قطر واقعی چاه درنظر گرفت. گرادیان بار هیدرولیکی در عرض بیش‌تر سلول‌های شبکه کوچک است، به‌طوری‌که متوسط بار هیدرولیکی در سلول تقریبا برابر گره می‌باشد. اما گرادیان بار هیدرولیکی در نزدیکی گره چاه نسبتا زیاد می‌باشد. مدل تفاضل محدود نمی‌تواند این گرادیان را به‌طور دقیق شبیه‌سازی نماید. زیرا مدل به‌جای گره، آب را از تمام سلول خارج و یا به آن تزریق می‌نماید. بار هیدرولیکی که از طریق مدل محاسبه می‌شود، شبیه‌سازی خوبی از بار هیدرولیکی چاه نیست، اما بارهای هیدرولیکی گره‌ها که دور از منابع تغذیه و تخلیه می‌باشند، صحیح هستند.

مدل می‌تواند بار هیدرولیکی را تا فاصله مشخصی (r_e) از چاه به خوبی شبیه‌سازی نماید. یک روش برای تخمین بار هیدرولیکی در چاه استفاده از فرمول‌های با مبنای معادله تیم[1] برای شرایط ماندگار است که می‌تواند برای شرایط شبه ماندگار در شرایطی که نرخ جابه‌جایی آب از ذخیره نزدیک چاه پمپاژ صفر باشد نیز به کار رود.

در شبیه‌سازی‌های ناماندگار می‌توان فرض کرد که بعد از یک مدت زمان کوتاه، کاهش آب از ذخیره در مجاورت چاه ناچیز است و براین اساس می‌توان معادله تیم را در این موارد به کار گرفت. باید در نظر داشت که شبیه‌سازی‌های دوبعدی سطحی یا شبه سه‌بعدی برای چاه‌هایی که کاملا در لایه آبدار نفوذ می‌نمایند به کار می‌روند. بار هیدرولیکی در چاه را می‌توان با استفاده از معادله تیم به صورت زیر محاسبه نمود:

$$h_w = h_{i,j} - \frac{Q_{WT}}{2\pi T} \mathrm{Ln}\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \qquad (۳۱-۲)$$

که در آن:

Q_{wT} = بده کل پمپاژ یا تزریق از چاه

1- Thiem

h_w = بار هیدرولیکی در چاه

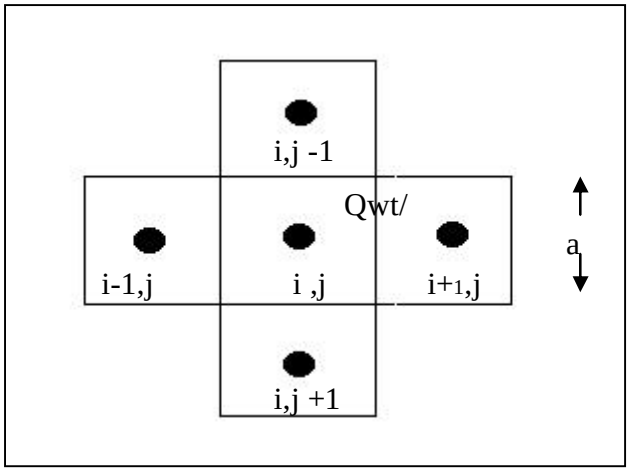
h_{Ij} = بار هیدرولیکی محاسبه شده توسط مدل تفاضل محدود برای گره چاه

r_e = فاصله شعاعی اندازه‌گیری شده از گره در جایی که بار هیدرولیکی برابر h_{ij} می‌باشد (شعاع موثر چاه)

T = ضریب قابلیت انتقال

r_w = شعاع چاه

معادله (۲-۳۱) برای محاسبه بار هیدرولیکی آب در چاه (h_w) در طول یک شبیه‌سازی ناماندگار با یک بار هیدرولیکی محاسبه شده توسط مدل (h_{ij}) و یک r_e تخمینی به کار می‌رود. در صورت وجود یک شبکه منظم در پیرامون چاه می‌توان نشان داد که r_e=۰/۲۰۸ a (شکل ۲ - ۱۴).



شکل ۲-۱٤- شبکه مدل دوبعدی در مجاورت یک گره پمپاژ یا تزریق که بده پمپاژ یا تزریق برابر Q_{wT} می‌باشد.

برای شبکه‌ای با ضریب گسترش ثابت N، $N = \Delta x_{i+1,j} / \Delta x_{i,j}$ محاسبه شعاع موثربه صورت زیر می‌باشد:

$$r_e = \frac{\Delta x_{ij}}{\sqrt{\pi}} c \qquad (۲-۳۲)$$

مقادیر C در جدول (۲-۶) بر حسب مقادیر انتخابی N ارائه شده است.

برای یک شبکه نامنظم که Δx و Δy دارای مقادیر ثابت بوده ولی با هم مساوی نیستند، $(\Delta x \neq \Delta y)$ و α برابر حداکثر نسبت سیما ($\Delta x / \Delta y$) یا ($\Delta y / \Delta x$) می‌باشد، می‌توان نوشت:

$$r_e = \sqrt{\frac{\Delta X . \Delta Y}{\pi}} E \qquad (۲-۳۳)$$

مقادیر E برای مقادیر انتخابی α در جدول (۲-۶) ارائه شده است.

جدول ۲-٦- محاسبه شعاع موثر چاه (r_e) برای شبکه‌های نامنظم [۵]

حالت کارتزین (اثر نسبت سیما(α))			حالت متقارن (اثر شبکه غیریکنواخت)	
E	ابعاد شبکه	α	C	N
۱/۰۰۲	۲۱*۲۳	۱/۱	۰/۶۰۶۵۳۱	۰/۰
۱/۰۰۸	۲۱*۲۵	۱/۲	۰/۶۰۶۰۲۴	۰/۱
۱/۰۱۷	۲۱*۲۷	۱/۳	۰/۶۰۴۵۱۸	۰/۲
۱/۰۲۸	۲۱*۲۹	۱/۴	۰/۶۰۲۰۳۵	۰/۳
۱/۰۴۱	۲۱*۳۱	۱/۵	۰/۵۹۸۶۱۴	۰/۴
۱/۰۷۷	۲۱*۳۶	۱/۷۵	۰/۵۹۴۳۰۲	۰/۵
۱/۱۱۸	۱۵*۲۹	۲/۰	۰/۵۸۹۱۵۶	۰/۶
۱/۲۰۴	۱۵*۳۶	۲/۵	۰/۵۸۳۲۳۵	۰/۷
۱/۲۹۰	۱۵*۴۳	۳/۰	۰/۵۷۶۶۰۳	۰/۸
۱/۳۷۵	۱۵*۵۰	۳/۵	۰/۵۶۹۳۲۳	۰/۹
۱/۴۵۶	۱۵*۵۷	۴/۰	۰/۵۶۱۴۵۷	۱/۰
۱/۵۳۵	۱۵*۶۴	۴/۵	۰/۵۵۳۰۶۸	۱/۱
۱/۶۱۰	۱۵*۷۱	۵/۰	۰/۵۴۴۲۱۴	۱/۲
۱/۷۵۴	۸*۴۳	۶/۰	۰/۵۳۴۹۵۳	۱/۳
۱/۸۸۷	۸*۵۰	۷/۰	۰/۵۲۵۳۳۸	۱/۴
۲/۰۱۲	۸*۵۷	۸/۰	۰/۵۱۵۴۲۰	۱/۵
۲/۱۲۹	۸*۶۴	۹/۰	۰/۵۰۵۲۴۶	۱/۶
۲/۲۴۰	۸*۷۱	۱۰/۰	۰/۴۹۴۸۶۲	۱/۷
			۰/۴۸۴۳۰۸	۱/۸
			۰/۴۷۳۶۲۳	۱/۹
			۰/۴۶۲۸۴۳	۲/۰
			۰/۴۴۱۱۲۵	۲/۲
			۰/۴۱۹۳۸۵	۲/۴
			۰/۳۹۷۸۱۴	۲/۶
			۰/۳۷۶۵۷۲	۲/۸
			۰/۳۵۵۷۸۶	۳/۰
			۰/۳۰۶۴۳۲	۳/۵
			۰/۲۶۱۵۴۱	۴/۰
			۰/۱۸۶۴۴۷	۵/۰
			۰/۱۲۹۹۸۰	۶/۰
			۰/۰۸۹۰۹۳	۷/۰
			۰/۰۶۰۲۶۲	۸/۰
			۰/۰۴۰۳۲۷	۹/۰
			۰/۰۲۶۷۵۱	۱۰/۰

$$r_e = \sqrt{\frac{\Delta X, \Delta Y}{\pi}} E$$

مقدارثابت $= \Delta X$

$\Delta Y =$ مقدارثابت

$$\Delta X = \Delta Y$$

$$N = \frac{\Delta X_{i+1,j}}{\Delta X_{i,j}} \quad r_e = \frac{\Delta X_{i,j}}{\sqrt{\pi}} C$$

با اصلاح معادله تیم برای شرایط آبخوان آزاد، معادله‌ای مشابه با معادله (۱-۱۱) به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$h_W = \sqrt{h_{i,j}^2 - \frac{Q_{WT}}{\pi K}\ln(\frac{r_e}{r_w})} \qquad (۳۴-۲)$$

معمولا در شبیه‌سازی های دو بعدی اثر نفوذ جزیی[1] چاه‌های پمپاژ یا تزریق در نظر گرفته نمی‌شود، زیرا اثرات نفوذ جزیی محدود به شعاعی $1.5(k_x/k_y)^{1/2}$ برابر ضخامت اشباع شده آبخوان می‌باشد. به این ترتیب خطاهای ایجاد شده در اثر تقریب بار هیدرولیکی چاه با بلوک تفاضل محدود و خطاهای دیگر تولید شده در اثر گسسته‌سازی معادلات، عموما با خطاهای ناشی از نفوذ جزیی که لحاظ نشده‌اند، از بین می‌روند.

در مدل‌های سه‌بعدی امکان شبیه‌سازی اثرات نفوذ جزیی وجود دارد زیرا گره‌های پمپاژ یا تزریق را می‌توان در هر لایه‌ای قرار داد. نرخ پمپاژ یا تزریق و همچنین محل چاه برای مدل تعریف می‌شود. با استفاده از مدل‌های تفاضل محدود و با توجه به این که نرخ پمپاژ برای هر لایه در نظر گرفته شده است، می‌توان اثرات پمپاژ از یک چاه را که در بیش از یک آبخوان نفوذ کرده شبیه‌سازی نمود.

برای در نظر گرفتن بده پمپاژ یا تزریق برای یک چاه چندلایه‌ای، باید دبی‌های جداگانه‌ای برای هر لایه‌ی تحت نفوذ چاه تعریف کرد، به‌طوری‌که کل نرخ پمپاژ یا تزریق برای چاه (Q_{WT}) برابر مجموع نرخ‌های پمپاژ یا تزریق از لایه‌های مجزا ($\sum Q_{i,j,k}$) باشد. نرخ های پمپاژ یا تزریق برای هر لایه را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به صورت تقریبی محاسبه کرد[۵]:

$$Q_{i,j,k} = T_{i,j,k}(Q_{WT}/\sum T_{i,j,k}) \qquad (۳۵-۲)$$

که در آن $T_{i,j,k}$ برابر ضریب انتقال یک لایه و $\sum T_{i,j,k}$ برابر مجموع ضرایب انتقال همه لایه‌های تحت نفوذ چاه می‌باشند. باید به خاطر داشت که رابطه (۲-۳۵) تقریبی است زیرا در این رابطه به این مساله که $Q_{i,j,k}$ تابعی از هد ($h_{i,j,k}$) بوده و در طول حل مجهول می‌باشد، توجه نشده است.

با معادلات تفاضل محدود مرسوم که در آنها فقط یک مسیر جریان برای جابه‌جایی آب در لایه آبدار در نظر گرفته شده است، نمی‌توان چاهی را که به بیش از یک آبخوان یا یک لایه نفوذ می‌نماید مدل نمود. بنابراین بار هیدرولیکی در یک چاه چندلایه‌ای ترکیبی از بار هیدرولیکی در همه لایه‌های تحت نفوذ می‌باشد.

۲-۱٤-٤- تغذیه و تخلیه در روش اجزای محدود

در مدل‌سازی به روش اجزای محدود نرخ پمپاژ یا تزریق در صورت قرار گرفتن چاه در گره، در خود گره در نظر گرفته می‌شود. اگر تغذیه یا تخلیه در یک گره قرار نگیرد جریان بین گره‌های المانی که شامل چاه است تقسیم می‌شود. در حالت دیگر آب به جای سطح اطراف گره‌ها از گره‌ها خارج می‌شود. به این دلیل با مدل‌های اجزای محدود می‌توان شبیه‌سازی تغذیه و تخلیه‌های نقطه‌ای را به ویژه زمانی که چاه مستقیما روی گره قرار داده شده باشد با دقتی بیش‌تر از مدل‌های تفاضل محدود انجام داد. مدل‌های اجزای

1-Partial penetration

محدود، بار هیدرولیکی را مستقیما در چاه پمپاژ یا تزریق محاسبه می‌نماید و بنابراین در این روش هیچ نیازی به استفاده از روش‌های تصحیح که در مدل‌های تفاضل محدود اشاره شد، نمی‌باشد.

۲-۱۴-۵- جریان از سطح ایستاب

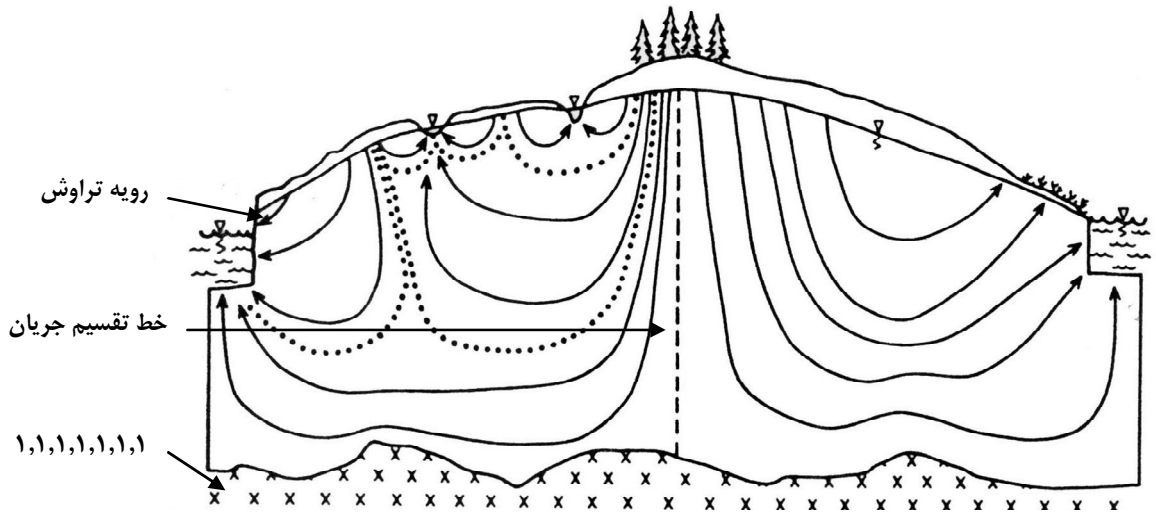
جریان‌های عبوری از سطح ایستابی به صورت یک منبع تغذیه یا تخلیه داخلی عمل می‌نماید به شرطی که مدل برای محاسبه سطح آب از فرضیات دوپویی استفاده نماید. به‌عبارت دیگر جریان‌از سطح ایستابی یک شرط مرزی است. در هر مورد باید یک ارائه از مقادیر جریان‌ها وارد نمود.

۲-۱۴-۶- تخمین جریان‌های عبوری از سطح ایستابی

جریان از سطح ایستابی به دو صورت تغذیه و تخلیه می‌باشد. تغذیه عبارت است از حجم آب نفوذ یافته که به سطح لایه آب می‌رسد و شامل بخشی از سامانه جریان آب زیرزمینی می‌شود. تخلیه عبارت است از آب زیرزمینی که از سطح ایستابی به سوی بالا حرکت کرده و مستقیما به سطح زمین یا ناحیه غیر اشباع تخلیه می‌شود.

تا کنون روش کاربردی مطمئنی برای محاسبه تغذیه آب زیرزمینی ارائه نشده است. هر چند در این رابطه روش‌های زیادی پیشنهاد شده است، اما بیش‌تر آنها به موفقیت محدودی دست یافته‌اند. به‌دلیل فقدان یک روش برای کمی‌کردن توزیع مکانی تغذیه و تخلیه، معمولا درصدی از میانگین بارندگی سالانه به عنوان یک نرخ تغذیه‌ی یکنواخت از سطح ایستابی در نظر گرفته می‌شود. نرخ تغذیه اغلب در طول واسنجی تعدیل می‌شود.

تجربه نشان می‌دهد که تغییرات زمانی و مکانی مهمی در نرخ تغذیه آب‌های زیرزمینی وجود دارد. مثلا در یک حوضه آب زیرزمینی مناطق مختلفی وجود دارد که جریان خالص از سطح ایستابی در این مناطق به‌صورت بالا رونده می‌باشد (شکل ۲-۱۵). گاه پهنه‌های تخلیه‌ی آب زیرزمینی بین ۵ تا ۳۰ درصد گستره حوضه‌ی آب زیرزمینی را می‌پوشاند [۵].



شکل ۲-۱۵- مناطق تخلیه در حوزه آب زیرزمینی که برخی از آنها همچون رویه تراوش، شرایط مرزی سامانه آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهند [۵].

۲-۱٤-۷- مدل‌سازی بیلان آب

همان‌طور که در فصل مدل مفهومی نیز اشاره شده است، بررسی تبادلات آب در یک محدوده که بر اصل بقای جرم استوار است، بیلان آب خوانده می‌شود. طبق این تعریف کلیه آب‌هایی که در یک زمان معین وارد یک محدوده خاص می‌شود، یا به مصرف می‌رسد یا ذخیره می‌شود و یا به صورت‌های مختلف از محدوده خارج شود را شامل می‌شود. منطقه‌ای را که اطلاعات پایه بیلان در مورد آن جمع‌آوری و معادله بیلان برای آن برقرار می‌شود، محدوده بیلان گویند که این محدوده در بسیاری از موارد در مدل آب زیرزمینی محدوده آبخوان می‌باشد. مقطع زمانی را که در طول آن کلیه‌ی عوامل بیلان مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، دوره بیلان گویند. بیلان آب را برای دوره‌های متفاوت یک ماه، یک فصل، یک سال آبی و یا چندین سال متمادی شامل سال‌های مرطوب، خشک و متوسط می‌توان تهیه نمود.

در بیلان آب زیرزمینی، مولفه‌های متفاوت آب ورودی و خروجی و تغییرات ذخیره در منابع آب زیرزمینی یا یک لایه آبدار مورد بررسی قرار می‌گیرند. مولفه‌های کلی بیلان آب زیرزمینی به صورت زیر می‌باشد:

الف – عوامل تغذیه:

- نفوذ از بارندگی در سطح محدوده موردنظر
- تغذیه طبیعی لایه آبدار از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و برکه‌ها در محدوده مورد مطالعه
- تغذیه مصنوعی از طریق آب آبیاری، از رودخانه‌ها، از طرح تغذیه مصنوعی، پساب صنعتی و فاضلاب شهری
- تغذیه از سنگ کف، سازندهای حاشیه دشت و آبخوان‌های مجاور
- جریان آب زیرزمینی ورودی به محدوده طرح

ب – عوامل تخلیه:

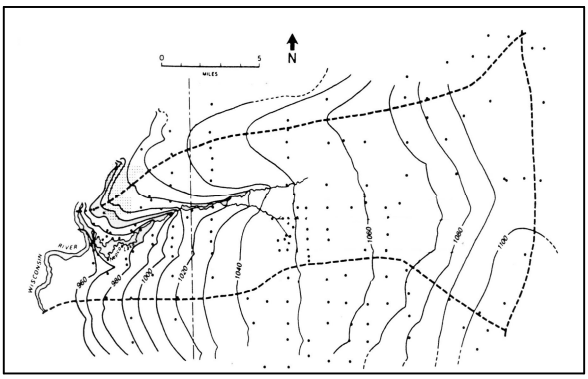
- تبخیر از آب زیرزمینی: در این مورد باید تبخیر و تعرق را در محل تعیین نمود.
- تخلیه طبیعی از لایه آبدار: به‌صورت چشمه‌ها و زهاب‌ها به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و برکه‌ها صورت می‌گیرد.
- تخلیه مصنوعی از منابع آب زیرزمینی: شامل آب خارج شده از منطقه توسط چاه‌ها، قنات‌ها، زهکش‌های مصنوعی و غیره می‌باشد.
- جریان آب زیرزمینی خروجی از محل مورد مطالعه شامل: سنگ کف، سازند حاشیه دشت و آبخوان‌های مجاور

با استفاده از نرم‌افزارهای بیلان آب، می‌توان توزیع مکانی نرخ تغذیه و تخلیه را با داشتن نقشه کنتور سطح ایستابی و ضریب هدایت هیدرولیکی و ضخامت لایه اشباع تخمینی محاسبه کرد. این روش را همچنین می‌توان به‌صورت دو بعدی یا سه‌بعدی با استفاده از هر مدل آب زیرزمینی که امکان محاسبه‌ی بیلان آب را داشته باشد، به کار برد. برای کلیه گره‌های سطح ایستابی، مقادیر بار هیدرولیکی از نقشه کنتور مربوطه تعریف می‌شود. با محاسبه بیلان آب، جریان بین سلول‌های سطح ایستابی و سلول‌های مجاور در مدل به‌دست می‌آید. اختلاف بین جریان ورودی و خروجی برای هر سلول، برابر تغذیه و یا تخلیه‌ای است که به‌صورت عمودی در سطح ایستابی رخ می‌دهد.

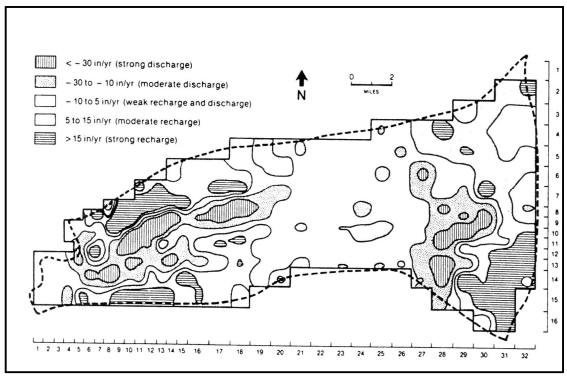
در شبیه‌سازی‌های دو بعدی، همه گره‌های شبکه به صورت گره‌های بار هیدرولیکی تعیین می‌شوند. در این حالت با توجه به معلوم بودن بار هیدرولیکی معادلات تفاضل محدود یا اجزای محدود حل نمی‌شوند. قسمت بیلان آب مدل، فقط برای محاسبه جریان‌هایی به کار می‌رود که به کمک آن تغذیه به دست می‌آید. در شبیه‌سازی‌های نیم‌رخ و سه‌بعدی، معادلات تفاضل محدود یا اجزای محدود حل می‌شوند، زیرا در این حالت پیش از محاسبه‌ی جریان برای گره‌های سطح ایستابی، باید بار هیدرولیکی در گره‌های زیر سطح ایستابی را محاسبه نمود.

این روش را می‌توان در هر مدل جریان که جریان‌های بین گره‌های بار هیدرولیکی تعیین شده را به صورت بخشی از بیلان آب محاسبه می‌نماید، به کار برد. جریان در گره‌ها به وسیله مدل محاسبه شده و به‌صورت خطوط کنتور رسم می‌شود و سرانجام نقشه تغذیه یا تخلیه حاصل می‌شود (شکل ۲-۱۶).

الگوی تغذیه یا تخلیه به‌دست آمده از این روش را می‌توان جهت تعیین توزیع محلی جریان‌ها استفاده نمود. سپس می‌توان از جریان‌ها به‌صورت شرایط مرزی جریان معین در شبیه‌سازی برای محاسبه بار هیدرولیکی در سطح ایستابی استفاده نمود. باید توجه داشت که جریان‌های محاسبه شده با این روش کاملا به مقادیر فرضی ضریب هدایت هیدرولیکی و بارهای هیدرولیکی بستگی دارد که با درون‌یابی از نقشه کنتوری سطح ایستابی به دست آمده‌اند. خطاهای موجود در ضریب هدایت هیدرولیکی و بارهای هیدرولیکی تخمین زده شده ممکن است، باعث ایجاد خطای زیادی در جریان‌های تخمینی شود.



الف) نقشه سطح آب یک حوضه آب زیرزمینی و یک ناحیه فرعی از آن که به صورت ورودی بیلان استفاده شده است.



ب) نقشه تغذیه و یا تخلیه تولید شده با مدل‌سازی بیلان آب برای حوضه آب زیرزمینی و یک ناحیه فرعی در نظر گرفته شده

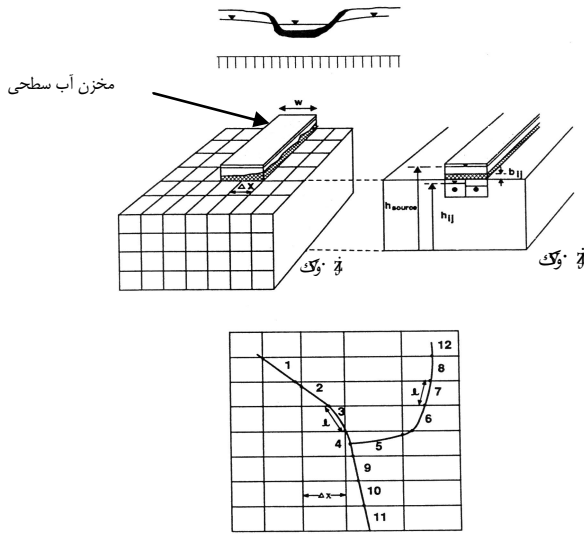
شکل ۲-۱۶- نمونه نقشه تولید شده نواحی تغذیه با استفاده از مدل‌سازی بیلان آب [۵].

۲-۱۴-۸- نشت

نشت عبارت است از حرکت آب از میان یک لایه که ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی آن کم‌تر از ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان است. با توجه به اختلاف نسبی بین بار هیدرولیکی آبخوان و مخزن موجود روی طرف دیگر لایه نشتی، نشت ممکن است به آبخوان وارد یا از آن خارج شود (شکل ۲-۱۷). علاوه بر این، جهت و حجم نشت ممکن است در طول شبیه‌سازی همانند بار هیدرولیکی تغییر نماید. مخزن تغذیه‌کننده می‌تواند یک آبخوان غیر محبوس، رودخانه و یا دریاچه باشد.

نشت یک نوع شرط مرزی وابسته به بار هیدرولیکی می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های دو بعدی سطحی، نشت از لایه‌های محبوس‌کننده با یک مولفه‌ی نشت شبیه‌سازی می‌شود. استفاده از مولفه نشت روش مناسبی برای شبیه‌سازی نفوذهای جزیی رودخانه‌ها و دریاچه‌ها در مدل‌های دو بعدی سطحی است. در یک شبیه‌سازی با اعمال مولفه‌ی نشت، مخزن تغذیه‌کننده به‌صورت مشخص در شبکه نمایش داده نمی‌شود، بلکه نشت به گره‌های مربوطه اضافه و یا از آن کم می‌شود (شکل ۲-۱۷). اگر بار هیدرولیکی در آبخوان بیش‌تر از بار هیدرولیکی در مخزن باشد آب از مدل خارج می‌شود. در غیر این‌صورت آب به‌صورت نشت به آن اضافه می‌شود. در هر حالت حجم نشت (Q_L^*) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_L^* = K_z'(\frac{h_{source} - h}{b'})wL \qquad (۲-۳۶)$$



الف- مخزن تغذیه که روی آبخوان قرار دارد. در این مثال عرض مخزن تغذیه(w) برابر $2\Delta x$ می‌باشد. بار هیدرولیکی در مخزن تغذیه برابر h_{Source} و بار هیدرولیکی در آبخوان زیر مخزن تغذیه برابر $h_{i,j,k}$ می‌باشد. رسوب بین مخزن تغذیه و آبخوان با علامت هاشور مشخص شده است.

ب- گسسته‌سازی رودخانه که به صورت یک مخزن تغذیه عمل می‌نماید. این مثال حالتی را نشان می‌دهد که $w << \Delta X$ است این حالت بسیار معمول‌تر از حالت نشان داده شده در شکل الف می‌باشد.

شکل ۲-۱۷- تصویر شماتیک از نمایش نشت

که در آن K_z' ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی لایه نشتی و b' ضخامت آن لایه می‌باشد. نسبت (K_z'/b') فاکتور نشت نامیده می‌شود. پارامترهای w و L به ترتیب عرض و طول مخزن تغذیه می‌باشند. h_{source} بار هیدرولیکی در مخزن تغذیه و h بار هیدرولیکی در آبخوان است که توسط مدل محاسبه می‌شود. مقادیر $l, w, h_{souurce}, b', K_z'$ را باید تعیین کرده و در مدل استفاده نمود. نشت (Q_L^*) باید به نشت سطحی تبدیل شود که در بالای سلول به کار می‌رود. مخزن تغذیه (به‌عنوان مثال دریاچه یا رودخانه) ممکن است باریک‌تر از بلوک‌ها یا المان‌های مدل باشد (شکل ۲-۱۷). نرخ نشت سطحی (L) باید طوری تطبیق داده شود که حجم آب ناشی از منبع تغذیه که از میان سطح $w\,L$ عبور می‌کند برابر حجم آب موجود در سطح سلول یا المان ($\Delta x \Delta y$) باشد. در این‌صورت:

$$L = Q_L^*/\Delta x\Delta y \text{ یا } Q_L^* = L\Delta x\Delta y \qquad (۲-۳۷)$$

به‌عنوان مثال در صورت استفاده از مدل MODFLOW باید فاکتور نشت و همینطور مقادیر L و w به مدل معرفی شود. سپس در کد اصلی برای هر رودخانه تطبیق لازم انجام گیرد (شکل ۲-۱۷). مدل AQUIFEM-1 نیز گزینه‌ای برای در نظر گرفتن رودخانه‌های باریک دارد. در مدل PLASM فرض می‌شود که w و L به اندازه ابعاد سلول هستند و اگر غیر از این باشد، باید مقدار فاکتور نشت سازگار $\left(K_z'/b'\right)_m$ به‌صورت زیر محاسبه شده و به مدل معرفی شود.

$$(\frac{K_z'}{b'})_m = \frac{K_z'}{b'}\frac{Lw}{\Delta x\Delta y} \qquad (۲-۳۸)$$

۲-۱۵- ارزیابی عدم قطعیت در پیش‌بینی مدل

۲-۱۵-۱- لزوم ارزیابی عدم قطعیت

هدف اصلی اجرای مدل‌های آب‌های زیرزمینی پیش‌بینی وضعیت سامانه در آینده می‌باشد. این پیش‌بینی معمولا با عدم قطعیت‌های ذاتی همراه است، زیرا الگوریتمی که برای مدل‌سازی انتخاب می‌شود با آنچه در طبیعت اتفاق می‌افتد دقیقا یکی نیست و به علاوه در تبدیل الگوریتم به یک نرم‌افزار فرضیاتی وجود دارد. حتی در مدل‌های خیلی پیچیده با واسنجی خوب، در اطلاعات و ورودی‌هایی که برای مدل‌سازی استفاده می‌شود، عدم قطعیت‌هایی وجود دارد. به عنوان مثال در شرایط مرزی اعمال شده به مدل و همچنین پیش‌بینی رژیم آب و هوایی و تغییرات در تناوب آبیاری عدم قطعیت‌هایی وجود دارد. با توجه به آنچه ذکر شد، ارائه عدم قطعیت در پیش‌بینی نتایج هر مدل با توجه به اهداف خاص آن الزامی است.

۲-۱۵-۲- روش‌های ارزیابی عدم قطعیت

به منظور ارزیابی عدم قطعیت در مدل‌سازی روش‌های مختلفی وجود دارد. دو روش مرسوم، روش تحلیل حساسیت و روش مونت‌کارلو می‌باشد که در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۱۵-۳- تحلیل حساسیت

هدف از تحلیل حساسیت این است که مشخص شود کدام پارامترها در پیش‌بینی رفتار سامانه آبخوان تاثیر بیش‌تری دارند. بدین منظور تاثیر تغییرات کوچک پارامترها در نتایج مدل به صورت کمی بیان می‌شود. اگر پارامترها به ترتیب اثر آنها در پیش‌بینی نتایج مدل مرتب شوند، مشخص می‌شود که برای کاهش اثر عدم قطعیت‌ها در مدل‌سازی، کدام پارامترها باید با دقت بیش‌تری برآورد شوند.

الف- روند انجام تحلیل حساسیت

در مدل‌های با پیچیدگی کم و واسنجی نشده با تحلیل حساسیت می‌توان عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها را بررسی نمود. به این معنی که عدم قطعیت در پارامترهای کلیدی باعث عدم قطعیت‌های زیادی در نتایج خواهد شد. در مدل‌های پیچیده و واسنجی شده، تحلیل حساسیت اهمیت پارامترها را در مدل‌سازی نشان می‌دهد، ولی میزان عدم قطعیت در نتایج را به‌درستی مشخص نمی‌کند. زیرا فرآیند تحلیل حساسیت باعث می‌شود، مدل از حالت واسنجی خارج شده و ارتباط درست بین پارامترهای سامانه از بین برود.

به منظور انجام تحلیل حساسیت، ابتدا باید مقادیر پایه پارامترها تعیین شود. در مدل‌های خیلی پیچیده مقادیر پایه پارامترها همان مقادیری است که با آنها واسنجی صورت گرفته است. در مدل‌های با پیچیدگی کم‌تر با یک تخمین معقول، مقادیر پایه برای پارامترها مشخص می‌شود. پس از مشخص شدن مقادیر پایه پارامترها، تحلیل با این پارامترها صورت می‌گیرد. سپس شبیه‌سازی با تغییرهای کوچک در هر پارامتر تکرار می‌شود. در مرحله بعد برای هر پارامتر با تقسیم مقدار تاثیر به مقدار تغییر در پارامتر، ضریب حساسیت تعیین می‌شود. سرانجام ضریب‌ها در مقادیر پایه پارامتر ضرب می‌شوند تا تمام آنها دارای یک واحد شوند. پس از بدون بعد شدن، ضرایب به ترتیب مقدارشان مرتب می‌شوند و بدین ترتیب معلوم می‌شود که کدام پارامترها اثر بیش‌تری روی نتایج دارند.

ب- تحلیل حساسیت برای مدل‌های ساده

برای مدل‌های ساده به دلیل این‌که تعداد پارامترها و همچنین زمان اجرای مدل کم است، می‌توان حساسیت مدل را برای تمام محدوده‌های ممکن برای پارامترها بررسی نمود و به این ترتیب یک تحلیل حساسیت کامل انجام داد.

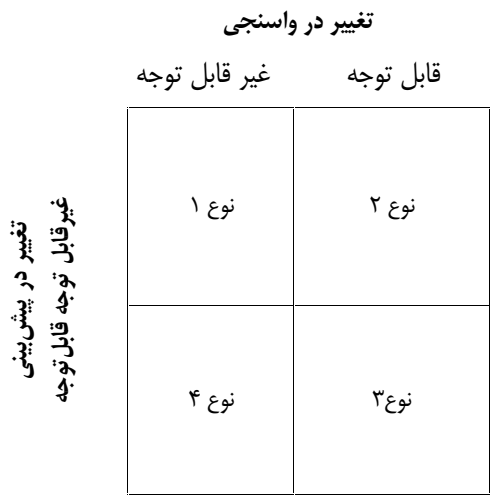
ج- تحلیل حساسیت در مدل‌های با پیچیدگی متوسط

برای مدل‌سازی‌های با پیچیدگی متوسط ضرایب حساسیت حداقل باید برای بهترین و بدترین شرایطی که هر پارامتر می‌تواند ایجاد کند، تعیین شود. البته می‌توان ضرایب را تنها برای بدترین شرایط هر پارامترتعیین نمود. بهتر است در صورت امکان به جای بررسی تغییرات هر پارامتر به صورت مستقل تغییرات ترکیبی از پارامترها که محدوده مشخصی دارند، مورد بررسی قرار گیرد (مثلا بده به جای سرعت و سطح). این عمل باعث کاهش پارامترهای موثر و در نتیجه تسریع در محاسبات خواهد شد.

د- تحلیل حساسیت در مدل‌های پیچیده و واسنجی شده

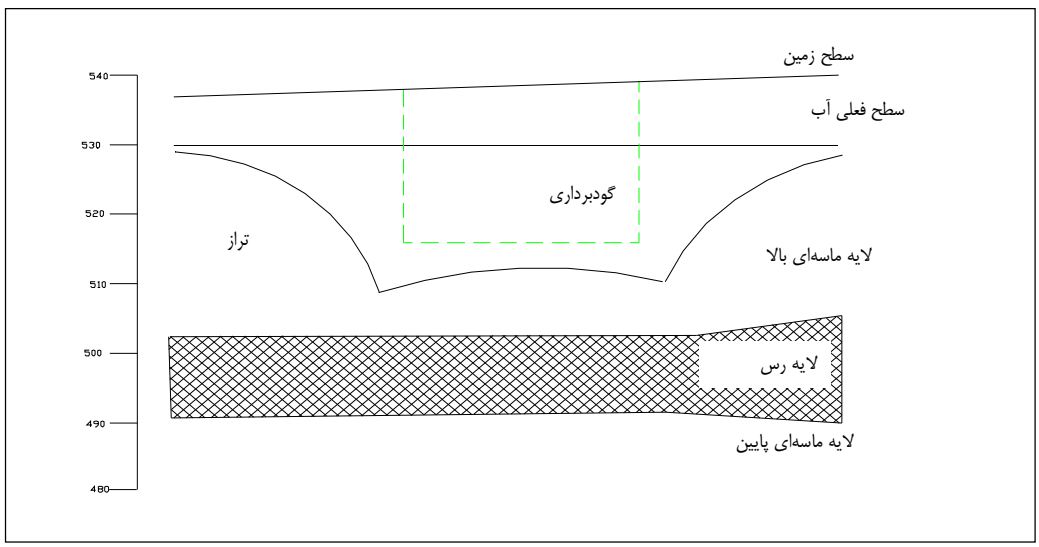
در مدل‌های پیچیده تحلیل حساسیت برای تمام پارامترهای موثر به زمان زیادی نیاز دارد. در این حالت تحلیل حساسیت کامل لازم نیست و یک تحلیل روی پارامترهای کلیدی در محدوده‌های بحرانی کافی است. مثلا می‌توان دو تحلیل با ۱۰ درصد افزایش و سپس کاهش در پارامترها انجام داد. در صورتی که تاثیر در جواب‌ها به صورت غیر خطی باشد به معنی آن است که ضرایب حساسیت بستگی به مقدار پارامترها و درصد تغییرات دارد. در این مدل‌ها در صورتی‌که واسنجی با سعی و خطا صورت می‌گیرد، بهتر است عملیات آنالیز حساسیت همزمان با آن انجام شود. البته لازم به یادآوری است که برای ارزیابی عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها در مدل‌های عددی پیچیده بهتر است از روش‌هایی غیر از تحلیل حساسیت استفاده شود. زیرا در روش تحلیل حساسیت، این مساله که با چه احتمالی پیش‌بینی‌ها قابل قبول است، مشخص نیست. در این موارد می‌توان به جای محاسبه ضرایب حساسیت، حساسیت‌ها با نمودار نمایش داده می‌شود. به این شکل که ابتدا پارامترهای موثر و محدوده تغییرات آنها مشخص شده و سپس برای هر پارامتر در محدوده تغییرات آن مدل اجرا می‌شود. سپس نمودار تغییرات پیش‌بینی مدل مشخصه و همچنین نمودار تغییرات معیار قابل قبول بودن واسنجی رسم می‌شود [۸].

با توجه به میزان حساسیت نتایج به تغییرات هر پارامتر، حساسیت جز یکی از چهار نوع قرار می‌گیرد(شکل ۲-۱۸). با توجه به این‌که حساسیت در کدام نوع قرار گرفته است مشخص می‌شود که عدم قطعیت در تعیین پارامتر مورد نظر تاثیر قابل توجهی روی نتایج خواهد گذاشت یا خیر. در نوع‌های ۱ و ۲ به دلیل این‌که تاثیر تغییرات پارامتر مورد نظر روی نتایج کم است، در صورتی‌که پارامتر مورد نظر خوب برآورد نشود باز هم تاثیر زیادی روی نتایج ندارد. نوع ۳ هنگامی مورد توجه قرار می‌گیرد که مدل واسنجی نشده باشد و در مدل‌های واسنجی شده مشکلی پیش نخواهد آمد. در صورتی‌که حساسیت‌ها در نوع ۴ قرار گیرد به دلیل یکسان نبودن ورودی‌ها برای واسنجی، در محدوده تغییرات پارامتر واسنجی مدل قابل قبول است، ولی تغییرات پارامتر تاثیر زیادی روی نتایج پیش‌بینی مدل می‌گذارد و در قسمت‌هایی از محدوده پارامتر ورودی نتایج پیش‌بینی قابل قبول نخواهد بود.

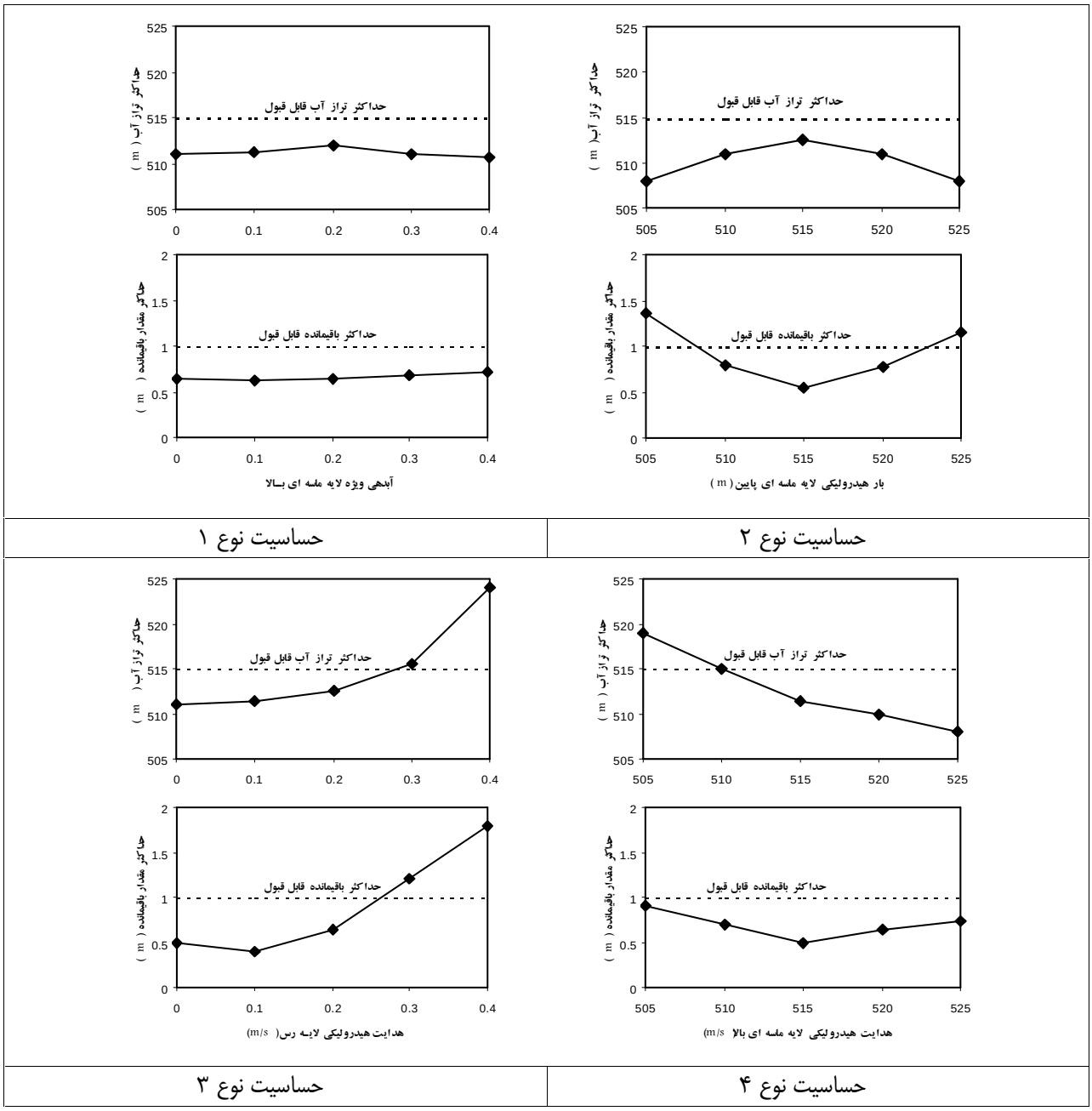


شکل ۲-۱۸- انواع حساسیت در یک مدل کالیبره شده

برای روشن‌تر شدن این بحث مثالی از زهکشی یک گودبرداری ارائه شده که در آن هدف نگه‌داشتن سطح آب پایین‌تر از یک مقدار حداکثر است. نتایج مدل و اعتبار واسنجی برای چهار پارامتر که در آن حساسیت‌ها در چهار نوع ممکن قرار گرفته، ارائه شده است (شکل‌های ۲-۱۹ و ۲-۲۰). در مورد آبدهی ویژه دیده می‌شود که در محدوده تغییرات پارامتر اختلاف نتایج اندازه‌گیری شده (ترازآب) با نتایج مدل (باقیمانده) از حداکثر ۱ متر کم‌تر است و واسنجی مدل قابل قبول می‌باشد. همچنین تراز آب محاسبه شده به وسیله مدل از حداکثر لازم برای گودبرداری کم‌تر است. بنابراین، در محدوده تغییرات آبدهی ویژه نتایج مدل قابل قبول است. در مورد بار هیدرولیکی لایه ماسه‌ای پایین با وجود این‌که در قسمتی از محدوده تغییرات پارامتر واسنجی مدل اعتبار ندارد، ولی نتایج در محدوده قابل قبول قرار دارد. در مورد هدایت هیدرولیکی لایه رس در همان محدوده‌ای که واسنجی مدل اعتبار ندارد، تراز آب از تراز حداکثر بیش‌تر می‌باشد. در مورد این پارامتر در صورتی که مدل برای این پارامتر کالیبره شده باشد، نتایج قابل اعتبار خواهد بود. هدایت هیدرولیکی لایه ماسه‌ای بالا در محدوده تغییرات پارامتر واسنجی قابل قبول است و در قسمتی از محدوده تراز آب محاسبه شده به وسیله مدل از مقدار حداکثر لازم بیش‌تر است. در مورد این پارامتر باید دقت زیادی صورت گیرد، زیرا نتایج مدل واسنجی شده ممکن است قابل اعتبار نباشد.



شکل ۲-۱۹- مشخصات هندسی مثال گودبرداری

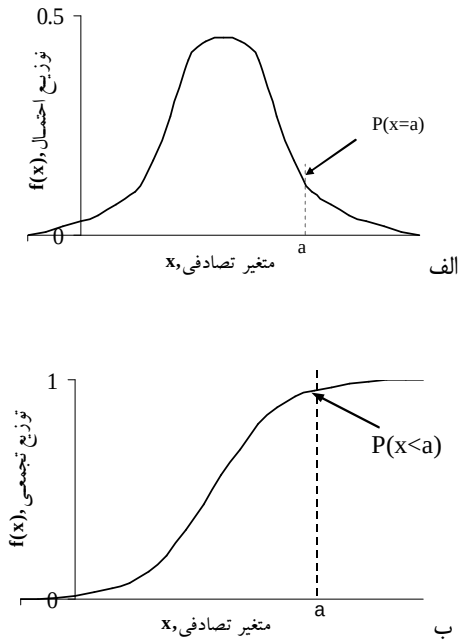


شکل ۲-۲۰- انواع حساسیت در مثال گودبرداری

(منظور از باقیمانده اختلاف نتایج اندازه‌گیری شده با نتایج مدل می‌باشد)

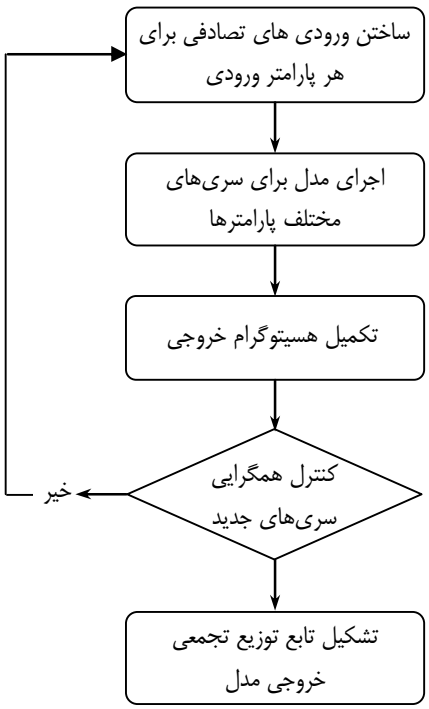
۲-۱۵-٤- روش مونت کارلو

روش مونت کارلو یک روش مرسوم برای آنالیز عدم قطعیت در مدل‌های عددی پیچیده است. این روش یک روش استوکستیک است و به کارگیری آن منوط به داشتن اطلاعات کافی در مورد دانش متغیرهای تصادفی و روش استوکستیک می‌باشد. در این روش فرض می‌شود که هر پارامتر ورودی در مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها یک متغیر تصادفی است که دارای یک تابع توزیع احتمال و یک تابع تجمعی احتمال می‌باشد(شکل ۲-۲۱). آلگوریتم روش مونت کارلو در شکل (۲-۲۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۱- الف:تابع توزیع احتمال، ب: تابع توزیع تجمعی برای یک متغیر تصادفی

گام اول در تحلیل این روش این است که تابع توزیع احتمال یا تابع تجمعی احتمال برای متغیرهای ورودی فرض و یا با توجه به اندازه‌گیری‌ها تعیین شود. تابع‌های توزیع احتمال معمول در مطالعات هیدرولوژیکی شامل توزیع نرمال، لگاریتمی‌نرمال، نمایی، یکنواخت، مثلثی، پواسن و بتا می‌باشد. توزیع بعضی از پارامترها مانند هدایت هیدرولیکی معمولا لگاریتمی نرمال فرض می‌شود و توزیع بعضی دیگر از پارامترها مانند تخلخل معمولا نرمال فرض می‌شود.



شکل ۲-۲۲- الگوریتم آنالیز به روش مونت‌کارلو

گام دوم این است که مقدار هر پارامتر ورودی مستقل، به صورت تصادفی و با توجه به تابع توزیع احتمال تعیین شود. به این منظور به کمک یک مولد عدد تصادفی برای هر پارامتر یک عدد بین ۰ و ۱ انتخاب می‌شود و سپس این عدد به کمک تابع توزیع احتمال و با توجه به میانگین و واریانس آن به مقدار احتمالی پارامتر تبدیل می‌شود. پس از تعیین یک سری پارامتر ورودی به صورت احتمالی این مرحله به دفعات (مثلا ۵۰ بار) تکرار می‌شود تا سری‌های مختلفی از پارامتر ورودی آماده شود. گام بعد این است که به کمک هر سری پارامتر ورودی یک بار مدل اجرا شود و نتایج تعیین شود.

در گام چهارم نمودار هیستوگرام داده‌های خروجی پس از هر بار شبیه‌سازی، بازسازی و رسم می‌شود و تعداد نتایج در هر محدوده مشخص می‌شود. به این ترتیب تابع توزیع احتمال تعیین می‌شود. در گام پنجم همگرایی تابع احتمال کنترل می‌شود. به منظور کنترل همگرایی سری‌های جدیدی از پارامترهای ورودی انتخاب شده و پس از تحلیل، تابع توزیع جدیدی رسم می‌شود. در صورتی‌که اختلاف بین دو نمودار قابل توجه باشد، آنالیز همگرا نشده است و باید نمودار جدیدی به کمک کل نتایج تحلیل رسم شود و دوباره از گام دوم به بعد تکرار شود تا اطمینان حاصل شود همگرایی صورت گرفته است. پس از اطمینان از همگرایی، تابع تجمعی احتمال خروجی تعیین می‌شود. به کمک این تابع، می‌توان ریسک انتخاب یک مقدار را به عنوان نتیجه مدل‌سازی تعیین نمود.

۲-۱۵-۵- موارد ویژه ارزیابی عدم قطعیت درمدل‌های آب زیرزمینی

۲-۱۵-٦- عدم قطعیت در آبدهی مجاز

آبدهی مجاز[1] مقدار بده قابل برداشت از آبخوان است که باعث تغییرات غیر قابل قبول در شرایط هیدرولیکی و زیست محیطی نمی‌شود و بستگی به میزان میانگین تغذیه درازمدت آبخوان دارد. میانگین تغذیه دراز مدت معمولا به طول زمان میانگین‌گیری و شروع آن حساس است. به منظور کاهش عدم قطعیت در میانگین تغذیه درازمدت، پس از تعیین یک دوره حداقل قابل قبول برای میانگین‌گیری، برای تمام دوره‌های ممکن که اطلاعات وجود دارد میانگین‌گیری صورت می‌گیرد و نتایج حاصله مرتب شده و احتمال وقوع حالات مختلف تعیین شده و تابع توزیع احتمال رسم می‌شود.

تابع توزیع، این دید را می‌دهد که انتخاب یک مقدار تغذیه میانگین سالانه و آبدهی مجاز برای آبخوان با چه ریسکی همراه است. محدودیت اصلی این روش انتخاب طول زمان میانگین‌گیری مناسب است. ویژگی اصلی روش این است که برای هر آبدهی مجاز، عدم قطعیت آن را به صورت کمی بیان می‌کند.

۲-۱۵-۷- عدم قطعیت در تنش‌های سامانه

تعیین عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های مدل، با بررسی نتایج پس از تکمیل زمان شبیه‌سازی و مقایسه پیش‌بینی‌های مدل با آنچه در واقعیت رخ داده امکان‌پذیر است. ممکن است نتایج پیش‌بینی با واقعیت اختلاف داشته باشد. یکی از دلایل این اختلاف عدم همخوانی تنش‌های اعمال شده به مدل با آنچه در واقعیت اتفاق افتاده است، می‌باشد.

1-Sustainable yield

الف- روش‌های کاهش عدم قطعیت در تنش‌های سامانه

- یکی از روش‌های کاهش عدم قطعیت ناشی از تنش‌های اعمال شده به مدل این است که شبیه‌سازی در محدوده وسیعی از حالت‌های مختلف تنش‌ها انجام گیرد. با این روش محدوده‌های مختلفی از پاسخ آبخوان نشان داده خواهد شد، ولی احتمال وقوع هر حالت را نمی‌توان به صورت کمی‌بیان کرد.
- یک روش دیگر استفاده از تحلیل مونت‌کارلو روی تنش‌های سامانه می‌باشد. در روش مونت‌کارلو همان‌طور که پیش‌تر ارائه شد، مقدار هر تنش از یک تابع توزیع احتمالی فرض شده یا اندازه‌گیری شده به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. اعمال این روش در مدل‌های عددی خیلی پیچیده که تنش‌ها تابع زمان و مکان هستند، بسیار مشکل است.
- یک روش عملی تر انتخاب پارامترها به صورت تصادفی از سری‌های زمانی است. به عنوان مثال فرض شود در یک شبیه‌سازی دوره زمانی تنش‌ها یک ماه است. مدت زمان شبیه‌سازی ۳۶ ماه و ماه شروع شبیه‌سازی فروردین است و برای ۳۰ سال اطلاعات موجود است. برای به‌دست آوردن اطلاعات فروردین اولین سال شبیه‌سازی، به طور تصادفی یک عدد از بین ۱ تا ۳۰ انتخاب می‌شود و اطلاعات فروردین آن سال مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس یک عدد تصادفی دیگر انتخاب می‌شود و اطلاعات اردیبهشت آن سال مورد استفاده قرار می‌گیرد و این روند ادامه پیدا می‌کند تا شبیه‌سازی تکمیل شود. تحلیل به دفعات (مثلا ۱۰۰ بار) با ورودی های مختلف صورت می‌گیرد و در هر حالت نتایج تعیین می‌شود. سپس نتایج مرتب می‌شوند و برای هر شاخص تابع‌های توزیع تجمعی رسم می‌شود. به کمک این تابع ها می‌توان احتمال وقوع هر پی‌آمد را به صورت کمی بیان کرد. برای مدل‌های پیچیده در این روش باید تعداد اجراها بیش‌تر شود.

ب- شبیه‌سازی‌های طولانی

اگر زمان شبیه‌سازی طولانی باشد (مثلا بیش از ۱۰ سال) یک پیش‌بینی ماندگار به کمک روش مونت‌کارلو مناسب‌تر است. در این حالت اثر عدم قطعیت در تنش‌ها را می‌توان به کمک تحلیل‌های مختلف در حالت‌های خشک، متوسط و مرطوب بررسی کرد. برای تحلیل در سه حالت فوق بهتر است تنش‌ها از تابع‌های توزیع تجمعی دراز مدت و با توجه به احتمال‌های ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد تعیین شوند. با توجه به پاسخ سامانه ممکن است روش ناماندگار پیش‌بینی مناسب‌تری از روش ماندگار بدهد.

۲-۱۵-۸- عدم قطعیت در پارامترهای آبخوان

عدم قطعیت در پارامترهای آبخوان (مانند تخلخل و ضریب هدایت هیدرولیکی) نیز از عواملی است که باعث عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های مدل می‌شود. به منظور انتخاب پارامترهای آبخوان برای شبیه‌سازی می‌توان از روش مونت کارلو استفاده کرد. یکی از محدودیت‌های این روش نیاز به زمان زیاد برای تحلیل کامل است. محدودیت دیگر دست‌یابی به توابع توزیع احتمالی برای پارامترهای مختلف در حالتی است که اطلاعات کم می‌باشد.

۲-۱۵-۹- روش‌های کاهش عدم قطعیت

به کمک آنالیز عدم قطعیت و حساسیت مشخص می‌شود که کدام پارامترها تاثیر بیش‌تری روی نتایج مدل می‌گذارند. عدم قطعیت در این پارامترها باعث عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های مدل خواهد شد و باید تخمین بهتری از آنها ارائه نمود.

روش مستقیم کاهش عدم قطعیت در پارامترهای ورودی، انجام اندازه‌گیری‌های اضافی برای تعیین بهتر پارامترهای کلیدی است. به کمک تحلیل مونت‌کارلو می‌توان بررسی نمود که اندازه‌گیری‌های جدید تا چه اندازه توانسته است، عدم قطعیت‌های نتایج مدل را کاهش دهد. روش غیر مستقیم کاهش عدم قطعیت‌ها انجام اندازه‌گیری‌های بیش‌تر برای خروجی‌های مدل است. پس از انجام این اندازه‌گیری‌ها به کمک مدل‌سازی معکوس می‌توان مدل را بهتر کالیبره نمود و مقادیر پارامترهای ورودی را بهتر تعیین نمود.

۲-۱۶- ارائه نتایج (گزارش نهایی مدل)

ارائه نتایج مدل در قالب یک گزارش کامل و مفید حایز اهمیت فراوان است. در اهمیت گزارش نویسی می‌توان گفت یک مدل هر قدر هم موفق و مهم باشد، اگر نتایج آن درست ارائه نشود، بی‌ارزش خواهد بود. تهیه گزارش، بخش مهمی‌از کار هر مدل‌ساز است. لذا آشنایی و تسلط کارشناسان به اصول فنی گزارش‌نویسی مدل تاثیر به سزایی در شناساندن مدل به دیگران داشته و باعث تسهیل استفاده از آن در آینده می‌شود.

در نوشتن هر گزارش باید مخاطب مورد توجه قرار گیرد تا گزارش به صورت گویا، کامل و بدون مطالب اضافی تهیه شود. در گزارش‌های مربوط به مدل آب زیرزمینی مخاطب یک فرد عامی نیست، بلکه شخصی با معلومات عمومی‌مهندسی و آشنا به کلیات مطالب است. مهم این است که نویسنده گزارش بتواند موضوع مدل و هدف آن‌را به نحو ساده بیان کند و سپس روش‌شناسی و نتایج نهایی به‌دست آمده را ارائه داده و سرانجام نتیجه روشن و گویایی از کار مدل‌سازی ارائه نماید.

۲-۱۶-۱- ثبت مراحل مختلف فعالیت‌ها در مدل‌سازی

در طول پیشرفت کار مدل، احتمال تغییرات زیادی در مقادیر پارامترها، شرایط مرزی و حتی استراتژی مدل‌سازی بین اجراهای اولیه و اجراهای پایانی مدل وجود دارد. در صورت ثبت این تغییرات در جدول ویژه‌ای که برای ثبت فعالیت‌های مدل‌سازی در نظر گرفته شده، می‌توان از اتلاف مقادیر زیادی زمان و انرژی در انتخاب نهایی پارامترها و شرایط مرزی جلوگیری نمود.

ثبت فعالیت‌های مدل‌سازی در طول مطالعه منجربه فراهم آوردن امکان بازسازی و اجرای دوباره مدل در آینده به ویژه برای افرادی غیر از تیم مدل‌ساز و کمک در تهیه گزارش نهایی مدل خواهد شد. این کار همچنین باعث کاهش زمان واسنجی مدل می‌گردد زیرا حالت‌های فراوانی در ترکیب مقادیر پارامتری را می‌توان تغییر داد و در صورت عدم ثبت تغییرات مزبور، امکان اعمال تغییرات بعدی به صورت مرتب نخواهد بود. لذا مواردی همچون هدف از هر اجرای مدل، تغییرات در فایل‌های ورودی، دلایل منطقی این تغییرات و تاثیر آن بر نتایج مدل باید به صورت یک جدول یا نمودار پیشرفت عملیات مدل‌سازی ثبت شود. بهتر است هر سری از اجراهای مختلف مدل را به نام خاصی ثبت نمود. مثلا سری الف برای اجراهای حالت ماندگار، سری ب برای حالت ناماندگار، سری ج برای ارزیابی مدل، سری «د» برای پیش‌بینی‌ها، سری «ه» برای آنالیز حساسیت و غیره.

همچنین کلیه‌ی نقشه‌ها و مدارک مورد استفاده در مراحل مختلف مدل‌سازی باید در بایگانی ویژه‌ای گردآوری شود تا بتوان از آنها در بازسازی‌ها و یا اجراهای بعدی مدل در آینده استفاده نمود.

۲-۱۶-۲- گزارش نهایی

گزارش نهایی مدل باید شامل هدف از تهیه مدل، معادلات حاکم، شرایط اولیه و مرزی، پارامترهای آبخوان، شبکه مورد استفاده در مدل عددی با موقعیت دقیق مرزها و مناطق تغذیه و تخلیه، نتایج واسنجی، آنالیز حساسیت، نتایج شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌ها باشد. همچنین فهرستی از فرضیات اعمال شده و داده‌های صحرایی که برای تهیه مدل مفهومی، تعیین محدوده مقادیر پارامترها، محاسبه شرایط اولیه، واسنجی مدل و تخمین بیلان آبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ارائه شود. ساختار گزارش نهایی به ترتیب زیر می‌باشد (جدول ۲-۷):

۲-۱۶-۲-۱- عنوان گزارش

اولین گام در تهیه یک گزارش فنی مدل، انتخاب یک عنوان مناسب برای آن می‌باشد. عنوان باید گویای علت و هدف اصلی از انجام مطالعات و بیانگر کارهای انجام شده باشد. برای مثال اگر هدف از انجام یک مطالعه مدل آب زیرزمینی، بررسی اثر پمپاژهای مختلف بر روی آبخوان منطقه قزوین باشد، در این صورت انتخاب عنوان «شبیه‌سازی اثر پمپاژ چاه‌های آب در منطقه قزوین» مناسب‌تر از عنوان «مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی آبخوان قزوین» خواهد بود.

۲-۱۶-۲-۲- خلاصه جامع

این قسمت شامل خلاصه‌ای از روش توسعه مدل، اهداف آن و یافته‌های مطالعه می‌باشد. خلاصه‌ای از عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های به وجود آمده و روش‌های برخورد با آنها (شامل کارهای تکمیلی صحرایی، مدل‌های تکمیلی، ...) ارائه می‌شود.

۲-۱۶-۲-۳- مقدمه

در این بخش ضمن معرفی موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، توضیحاتی کلی در مورد ویژگی‌های آب و هوایی و اقلیمی منطقه ارائه می‌شود.

مقدمه همچنین باید موارد زیر را در بر داشته باشد:

الف ـ بیان موضوع، هدف از انجام مطالعات و سیمای کلی طرح

ب ـ طبقه‌بندی دلایل برای تهیه گزارش

ج ـ توضیح روش‌های کلی به کار رفته

د ـ مروری بر مطالعات انجام شده

در قسمت مروری بر مطالعات انجام شده، مرور مختصری بر مطالعات مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی انجام شده توسط دیگران در منطقه شامل سابقه مدل‌سازی و کاربردهای آن، فرضیات انجام شده و محدودیت‌های استفاده از هر مدل‌سازی، ذکر موفقیت یا عدم موفقیت مدل در رسیدن به اهداف مورد نظر و بیان علل آن، بررسی و ارزیابی نقاط ضعف و قوت مطالعات قبلی، ذکر وجه تمایز مدل حاضر با مدل‌های قبلی و ارائه قابلیت‌های جدید و ویژه مدل حاضر باید بررسی شود و تا جای ممکن از ذکر جزییات

مطالعات قبلی پرهیز و به صورت کلی به آن پرداخته می‌شود. در صورت امکان جدولی از قابلیت‌ها، فرضیات، محدودیت‌ها، مزایا و معایب و سایر پارامترهای مهم مدل، برای مدل حاضر و مدل‌های قبلی تنظیم و با هم مقایسه شوند.

جدول ۲-۷- ساختار گزارش مدل

ردیف	عنوان		شرح
۱	عنوان پروژه		انتخاب عنوان دقیق منطبق با هدف طرح و نتایج مورد انتظار
۲	خلاصه جامع		خلاصه‌ای از روش توسعه مدل اهداف موردنظر و یافته‌های مطالعه. خلاصه‌ای از عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های به وجود آمده و روش‌های احتمالی مقابله با آنها (مثل کارهای صحرایی با مطالعات مدل تکمیلی یا . . .)
۳	مقدمه		معرفی اهداف مطالعه منطقه مورد مطالعه مروری بر کارهای مرتبط گذشته مروری کلی بر روش‌شناسی کار (فلوچارت حل مساله)
۴	وضعیت هیدروژئولوژیکی و مدل مفهومی		مروری بر زمین‌شناسی چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی منطقه هیدروژئولوژی منطقه (پارامترهای آبخوان بیلان و مولفه‌های آن . . .) معرفی دقیق مدل مفهومی منطقه به صورت بلوک دیاگرام یا روش‌های گرافیکی دیگر، معرفی واحدهای آب چینه‌ای ویژگی‌های جریان ارائه نقشه‌ها (زمین‌شناسی، توپوگرافی منابع آب هیدروژئولوژی . . .) و نیمرخ‌های مربوطه
۵	طراحی مدل	معرفی کد و رابط گرافیکی	معرفی کد انتخاب شده و رابط گرافیکی مربوطه و بخش‌های مختلف آن در صورت غیرهمگانی بودن یا تغییر در کد توجیه انتخاب و تغییرات اعمال شده
		تبدیل مدل مفهومی‌به مدل عددی	شرح چگونگی تبدیل مدل مفهومی به مدل عددی (تقسیم‌بندی زمانی و مکانی گستره مدل تعریف مرزها تعریف پارامترها برای گره‌ها و سلول‌ها) توجیه انتخاب ابعاد مدل عدم قطعیت در پارامترها و تنش‌ها
		واسنجی و ارزیابی	شرح روند واسنجی و اهداف آن به صورت نمودارهای گرافیکی مقایسه‌ای بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده شرح خطاهای حاصله شرح تغییرات اعمال شده در مقایسه بیلان شبیه‌سازی شده یا محاسبه شده
		آنالیز حساسیت	ثبت حساسیت نتایج به نوسانات مقادیر پارامترها اندازه سلول‌ها شرایط مرزی و معیارهای واسنجی
		پیش‌بینی	توصیف عدم قطعیت در مدل واسنجی شده و عدم قطعیت در تنش‌های هیدرولوژیکی آینده (منابع خطا در شبیه‌سازی پیش‌بینی) شبیه‌سازی سناریوهای مختلف به منظور آشکار ساختن عدم قطعیت در وقایع آینده
۶	محدودیت‌های مدل		عدم قطعیت‌ها در رابطه با مدل مفهومی واسنجی مدل شبیه‌سازیهای پیش‌بینی و روش‌های احتمالی برطرف نمودن آن ها (جمع‌آوری داده‌های بیش‌تر آنالیز داده‌ها مدل‌سازی‌های بعدی . . .)
۷	بررسی و تفسیر نتایج		
۸	نتیجه‌گیری و پیشنهادها		ارائه نتایج مهم به‌دست آمده در مطالعات مدل پیشنهادهای ضروری در رابطه با جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات بیش‌تر برای اصلاح واسنجی و مدل مفهومی پیشنهاد برای طرح‌های مدیریتی و کارهای بعدی
۹	کتابنامه		مشخصات کلیه کتاب‌ها مقاله‌ها گزارش ها نرم افزارها و راهنماهای آنها که در گزارش استفاده شده‌اند.
۱۰	واژه‌نامه		معادل فارسی و لاتین واژه‌های تخصصی به کار رفته در گزارش
۱۱	پیوست‌ها		کلیه بحث‌های فنی غیرقابل ارائه در بدنه گزارش داده‌های خام و پردازش شده به صورت جدولی یا نمایشی متن کد مورد استفاده

۲-۱۶-۲-٤- وضعیت هیدروژئولوژیکی و مدل مفهومی

در این قسمت اطلاعات مربوط به سامانه آب زیرزمینی شامل وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی و مدل مفهومی‌همراه با فرضیات و ساده‌سازی‌های مربوط به آن ارائه می‌شود. نقشه منطقه که شامل اطلاعات توپوگرافی و منابع آب‌های سطحی می‌باشد، نیز در این قسمت ارائه می‌شود.

اطلاعات زمین‌شناسی باید شامل اطلاعات چینه‌شناسی و ویژگی‌های محیط رسوبی بوده و همراه با نقشه زمین‌شناسی، نیمرخ‌های مربوطه و ستون چینه‌شناسی ارائه شود. مفهوم واحدهای آب-چینه‌ای و نیز شرح کامل پارامترهای هیدروژئولوژیکی مانند تخلخل، ضریب ذخیره، هدایت هیدرولیکی و بحث تغییرات مکانی این پارامترها در منطقه طرح مربوط به این قسمت می‌باشد. همچنین روش‌های تخمین مقادیر پارامترها، و محدوده‌های مورد قبول برای آنها مورد بحث قرار می‌گیرد.

کلیه پارامترهای ارائه شده در این بخش (که از اطلاعات پایه مدل مفهومی به دست آمده و پیش از تهیه مدل موجود بوده) باید کاملا قابل تشخیص از مقادیر پارامتری ارائه شده در مرحله‌ی واسنجی باشند. تغییراتی که در مرحله واسنجی مدل در پارامترها اعمال شده در بخش‌های بعدی گزارش مورد بحث قرار می‌گیرند.

مقادیر بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده صحرایی باید به صورت نقشه (و در صورت وجود داده‌های کافی روی نیمرخ) نشان داده شوند. مسیرهای جریان آب زیرزمینی و موقعیت مناطق تغذیه و تخلیه نظیر رودخانه‌ها، چشمه‌ها، زهکش‌ها، مناطق آبیاری شده و چاه‌های پمپاژ روی نقشه مشخص می‌شود.

مدل مفهومی منطقه باید براساس وضعیت زمین‌شناسی، پارامترهای هیدروژئولوژیکی و سامانه سه‌بعدی جریان ارائه شود. مرزهای هیدرولیکی و فیزیکی سامانه نیز از تفسیر سامانه جریان و وضعیت زمین‌شناسی مشخص می‌شود. نمایش شماتیکی از واحدهای آب-چینه‌ای و سامانه جریان به صورت دو یا سه‌بعدی همانند آنچه که در نمودار ۲-۴ (بخش مدل مفهومی) نشان داده شده است به عنوان حاصل مدل مفهومی ارائه خواهد شد. همچنین بر پایه‌ی داده‌های صحرایی، بیلان آب در شرایط ماندگار (و در صورت امکان غیرماندگار) همراه با شرحی بر چگونگی برآورد یا تخمین هر مولفه‌ی بیلان، ارائه خواهد شد. اطلاعات مزبور باید به‌صورت جدولی ارائه شوند.

۲-۱۶-۲-۵- طراحی مدل

در این قسمت شرح مختصری از کد انتخاب شده، کاربردهای عملی مدل، رابطه بین مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل عددی و پارامترهای به کار رفته در تهیه مدل مفهومی، تشریح روند حل مساله به صورت دقیق، ابزار مورد استفاده، درجه موفقیت مدل در دست‌یابی به اهداف تعریف شده، اهداف و روش کار واسنجی، نتایج مدل و آنالیز حساسیت مدل ارائه می‌شود. در این بخش باید مواردی که در ذیل آمده است، مد نظر قرار داد.

- معرفی کد انتخاب شده

در این قسمت مدل عددی انتخاب شده، دلایل انتخاب آن از میان دیگر مدل‌های موجود، نحوه اجرای مدل، نحوه تعریف پارامترها و ایجاد فایل ورودی سامانه، نحوه دریافت اطلاعات خروجی از سامانه و تعریف پارامترهای خروجی، سامانه سخت افزاری مورد استفاده، جهت اجرای کد مورد نظر و نرم‌افزارهای تکمیلی جهت اجرای برنامه (شامل پیش پردازنده و پس پردازنده) توضیح داده

می‌شود. در صورت اعمال تغییر یا اصلاح در کد اصلی (بنا به اهداف پروژه) باید موارد تغییر ذکر شود. اطلاعات مربوط به کد شامل نام، نسخه، راهنمای استفاده، تهیه‌کنندگان و غیره در این قسمت ارائه می‌شود. در پایان گام‌های اساسی اجرای برنامه به صورت شماتیک ارائه می‌شود.

- معادلات حاکم و فرضیات ساده‌کننده

در این قسمت معادلات حاکم بر مساله و روابط موجود به صورت کامل و دقیق ارائه می‌شود. با استفاده از یک سری فرضیات ساده کننده در مسایل می‌توان مسایل پیچیده را با هزینه کم‌تر و در زمان کم‌تر تحلیل نمود، بدون این‌که تاثیر به سزایی در تحلیل داشته باشد. لذا در این قسمت تمام فرضیات در نظر گرفته شده جهت ساده‌سازی مساله و تطبیق آن با مدل انتخاب شده بیان می‌شود.

- گسسته‌سازی زمانی و مکانی

اگر روش شبیه‌سازی شامل گسسته‌سازی معادلات (به عنوان مثال روش تفاضل محدود یا اجزای محدود) باشد، باید شبکه مورد استفاده و نحوه گسسته‌سازی معادلات تشریح شود. گسسته‌سازی زمانی و مکانی به گونه‌ای انجام می‌شود که بتواند تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای هیدرولیکی، ویژگی‌های منابع آبی و سازه‌ها مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، زهکش‌ها، چاه‌ها و سدها و تنش‌ها مانند پمپاژها، تبخیر و تعرق از آب زیرزمینی، تغذیه از طریق نفوذ، تغییرات سطح رودخانه، تراوش از آبخوان‌های دیگر و غیره را به مدل منعکس کند. ارائه نقشه (با مقیاس) شبکه گسسته شده منطبق بر منطقه مورد مطالعه ضروری است. در حالت غیرماندگار باید گسسته‌سازی در زمان نیز انجام شود. در هر دو مورد گسسته‌سازی زمانی و مکانی، معیارهایی که در گسسته‌سازی مورد نظر بوده‌اند، باید مطرح شوند.

- تعریف شرایط مرزی و شرایط اولیه

در این قسمت شرایط اولیه برای جریان‌های غیرماندگار و همچنین نحوه انتخاب شرایط مرزی و نحوه اعمال آنها به مدل به صورت کامل و دقیق تشریح می‌شود.

- تعریف پارامترها برای سلول‌ها و گره‌ها

چگونگی تعریف متغیرها و مقادیر پارامتری و نیز معیارهای پهنه‌بندی منطقه بر اساس ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی در این قسمت توضیح داده خواهد شد.

- واسنجی و ارزیابی مدل

در این قسمت فرآیند واسنجی شرح داده شده و منشا و بزرگی خطاها و نیز تاثیر آنها در نتایج، مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضمنا تغییر در مقادیر پارامترها، مرزها و تنش‌ها و نیز این‌که این تغییرات چگونه در واسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند، توضیح داده می‌شود. در پایان باید فهرستی نهایی از مقادیر پارامترها و تنش‌ها برای آخرین واسنجی ارائه شود.

مقادیر بارهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در صحرا با مقادیر بارهای شبیه‌سازی شده به صورت نمودارهای روشن و گویا با هم مقایسه می‌شوند. بخش‌هایی از شبکه که نقش بیش‌تری در ایجاد خطاهای مدل دارند، باید مشخص شوند. بیلان آبی شبیه‌سازی شده با بیلان آبی محاسبه شده بر پایه‌ی داده‌های صحرایی نیز مقایسه می‌شود. جهت ارزیابی بهتر مدل و تعیین درجه اعتبار آن می‌توان از گروه دیگری از داده‌های صحرایی استفاده کرد.

۲-۱۶-۲-۶- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت تطابق یا عدم تطابق مدل واسنجی شده را با اهداف واسنجی نشان می‌دهد. در این قسمت از گزارش، حساسیت نتایج نسبت به تغییر مقادیر پارامترها، اندازه و ابعاد شبکه، شرایط مرزی و حدود واسنجی بیان می‌شود. بحث و توجیه آنالیز حساسیت همراه با یک سری شکل‌ها و جداول گویا که نشان دهنده نتایج آنالیزها می‌باشد، ضروری است.

۲-۱۶-۲-۷- پیش‌بینی

پس از حصول اطمینان از واسنجی شدن مدل و نیز پس از دست‌یابی به اطلاعات کافی برای تخمین تنش‌های مصنوعی (پمپاژ، تغذیه مصنوعی، زهکشی ...) و هیدرولوژیکی که در آینده به سامانه اعمال خواهند شد، می‌توان از مدل برای پیش‌بینی واکنش سامانه به تنش‌های مزبور استفاده نمود. در این بخش نیز باید محدودیت‌های پیش‌بینی و عدم قطعیت در تنش‌ها (چه خود تنش و چه دوره زمانی در نظر گرفته شده) و نیز فرضیات در نظر گرفته شده، ارائه شوند. برای این امر یک آنالیز حساسیت باید روی مدل پیش‌بینی انجام شود. همچنین تعدادی سناریوی محتمل برای تعیین عدم قطعیت در اتفاقات آینده باید شبیه‌سازی نمود. نتایج شبیه‌سازی را می‌توان به صورت نمودار یا نقشه‌های کنتوری نمایش داد.

۲-۱۶-۲-۸- محدودیت‌های مدل

در این بخش محدودیت‌های روش مدل‌سازی و اثرات این محدودیت‌ها در جواب‌های به‌دست آمده، محدودیت‌های کاربرد عملی مدل براساس فرضیات ساده کننده و میزان قابل اعتماد بودن واسنجی و حساسیت مدل به پارامترهای گوناگون مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱۶-۲-۹- بررسی و تفسیر نتایج

در این مرحله نتایج حاصل از شبیه‌سازی مساله مورد نظر به صورت نمودار، جدول و یا نقشه‌های کنتور ارائه می‌شود. در این‌جا باید به نکات زیر توجه کرد:

- پرهیز از ارائه اطلاعات خروجی مدل به صورت عدد (مخصوصا اگر تعداد اعداد زیاد باشد) و ارائه نتایج به صورت نمودار و شکل‌های گویا و روشن
- ارائه مختصر و مفید نتایج و پرهیز از کلی‌گویی و ارائه اطلاعات غیرمفید
- ارائه نمودارهای درختی تا حد امکان جهت تشریح عوامل موثر در پدیده مورد مطالعه
- ارائه منحنی‌های مقایسه‌ای گزینه‌های مختلف در صورت موجود بودن

- ارائه منحنی‌های مقایسه پارامترهای مدل شده با داده‌های صحرایی و مطالعات قبلی
- ارائه جداول مزیت‌ها و معایب گزینه‌های مختلف

۲-۱۶-۲-۱۰- تفسیر نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از مدل و شبیه‌سازی مساله مورد بحث و بررسی قرار گرفته و نتایج با دقت تفسیر می‌شوند. در این قسمت موارد زیر در نظر گرفته می‌شود:

- ارائه تفسیر روی هر نمودار منحنی یا نقشه ارائه شده در نتایج
- دقت روی نقاط دارای تغییرات ناگهانی در نتایج و ارائه تفسیر متناسب با آن
- بررسی وابستگی مساله به اندازه شبکه: برای این منظور حل مساله با دو حالت مختلف از نظر اندازه شبکه (شامل آخرین شبکه که دقت قابل قبولی در ارائه نتایج داشته) باید در قسمت نتایج ارائه شده و نتیجه در این قسمت تفسیر شود.
- توجیه علل اختلاف‌های احتمالی بین نتایج مدل و نتایج مطالعات دیگر و داده‌های صحرایی
- تعیین صحت و دقت نتایج ارائه شده برای هر پارامتر مدل شده
- تعیین حدود کاربرد عملی نتایج و علل محدودیت‌های آن
- بررسی رابطه بین فرضیات ساده‌کننده مدل و دقت نتایج حاصله

۲-۱۶-۳- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این قسمت فهرستی از نتایج به دست آمده تهیه و اطلاعات مورد نیاز برای سامانه مدیریتی به‌روشنی توضیح داده می‌شود.

چنانچه واسنجی موفقی انجام نشده باشد باید داده‌های صحرایی مورد نیاز برای بهسازی مدل مفهومی و تکمیل آن برای دست‌یابی به یک واسنجی موفق را ارائه نمود. همچنین لازم است در این قسمت پیشنهادات لازم جهت بهبود مطالعات آینده و نیل به اهداف پروژه و نیز پاسخ به سوالات بی‌جواب مانده ارائه شود.

۲-۱۶-٤- پیوست‌ها

مطالب مفیدی که ارائه آن در گزارش اصلی غیرضروری به نظر می‌رسد در قسمت پیوست‌ها ارائه می‌شوند. معمولا پیوست‌ها پشتوانه اطلاعاتی تکمیل‌کننده مطالب اصلی می‌باشند. عکس‌ها، جداول و نمودارهایی که دارای اهمیت است در گزارش اصلی می‌آیند، ولی آمار و اطلاعات خام، شرح و بسط مشتقات ریاضی، نمودار چاه‌ها (Log) تراز سطوح آب، جزییات محاسبات بیلان آب، فایل‌های ورودی و برخی توضیحات ضروری در مورد دستگاه‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری پارامترهای هیدروژئولوژیکی و نتایج واسنجی آنها، مطالب کمکی، فرم‌های استاندارد جمع‌آوری اطلاعات و نیز مثال‌هایی برای کمک به خواننده در پیوست می‌آید. همچنین در صورت اعمال تغییرات در مدل عددی، متن برنامه تغییر یافته در پیوست ارائه می‌شود.

فصل ۳

مدل ریاضی کیفی آب‌های زیرزمینی

۳-۱- مبانی مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی

مدل ریاضی در آلودگی آب‌های زیرزمینی در واقع فرم ریاضی معادلات بیلان و حرکت و انتقال مواد محلول را در یک محیط آب زیرزمینی نشان می‌دهد که با تلفیق آنها و با فرض پیوستگی محیط[1]، معادلاتی به صورت معادلات دیفرانسیل جزیی نتیجه می‌شود. این معادلات در نقاط مختلف یک آبخوان نوشته شده و از طریق روش‌های مختلف، برای مکان‌ها و زمان‌های گوناگون حل می‌شوند.

مدل‌های ریاضی در آلودگی آب‌های زیرزمینی و یا به عبارت دیگر حل معادلات دیفرانسیل جزیی در سامانه کیفی آبخوان می‌تواند به دو صورت تحلیلی[2] و عددی[3] انجام شود. با این‌که روش دقیق حل معادلات روش تحلیلی می‌باشد، ولی پیچیدگی سامانه آبخوان، غیرهمگنی سازندهای زمین‌شناسی، برداشت و تغذیه‌های متفاوت چه به صورت طبیعی و چه مصنوعی و به خصوص وجود آلاینده‌های مختلف باعث می‌شوند که حل تحلیلی معادلات به‌جز در شرایط ساده و حالت خاص، امکان‌پذیر نباشد. به همین جهت استفاده از روش‌های عددی در تهیه مدل‌های ریاضی در آب‌های زیرزمینی به دلیل قابلیت‌های ویژه‌ای که دارند، بیش‌تر از سایر روش‌ها معمول می‌باشد.

قبل از تهیه مدل یک آبخوان لازم است از سامانه آلاینده‌های آن شناخت کافی به‌دست آوریم. لذا باتوجه به متغیر بودن و تنوع آلودگی‌های آبخوان، ابتدا در مورد انواع آلاینده‌ها و چگونگی آلوده شدن آبخوان به طور خلاصه در زیر بحث می‌شود.

۳-۱-۱- آلودگی غیرمتمرکز یا توزیعی یا آلودگی با منبع غیرنقطه‌ای[4]

در آلودگی با منبع غیر نقطه‌ای، آلاینده‌ها در سطح آبخوان و یا دشت به طور گسترده، توزیع و آلودگی در سراسر آبخوان به صورت غیرمتمرکز پخش می‌شود. به طور مثال می‌توان آلاینده‌هایی که در بخش کشاورزی به صورت استفاده از کودهای شیمیایی، علف‌کش‌ها و سموم دفع بیماری‌های گیاهی رخ می‌دهد را نام برد.

فرآیند این نوع آلایندگی به خصوص زمانی که آبخوان نزدیک به سطح زمین و کم عمق باشد به مراتب سریع‌تر به آب زیرزمینی منتقل می‌شود. در نتیجه این فرآیند، آبخوان در مدت زمان کوتاهی آلوده شده و در پی آن خطرات جبران‌ناپذیری را به محیط زیست وارد می‌سازد. به عنوان مثال می‌توان مناطقی چون ساحل دریای خزر در شمال، دشت‌هایی مانند دشت سیستان، دشت سلماس، دشت جنوب تهران، بعضی از مناطق غرب و جنوب کشور را نام برد.

از طرف دیگر فرهنگ غیرعلمی و غیرمنطقی استفاده از کودهای شیمیایی به منظور تولید بیش‌تر که در کشاورزان رایج می‌باشد، باعث شده است که استفاده از مواد شیمیایی در کشاورزی به طور تصاعدی رشد کرده و باعث افزایش روزافزون آلودگی آب زیرزمینی شود.

1- Continum approach
2- Analytical
3- Numerical
4- Non – Point source pollution

علاوه بر مساله فوق که عامل اصلی آن انسان و بخش کشاورزی می‌باشد، جنس سنگ کف آبخوان، می‌تواند در بعضی از مناطق به عنوان یک آلاینده غیرمتمرکز و توزیعی عمل کند. به طور مثال در صورتی که نوع سنگ کف از نئوژن واریزه‌ای حاوی املاح تبخیری می‌باشد، ارتباط آن با آب‌های زیرزمینی باعث می‌شود که بر اثر فعل و انفعالات شیمیایی به طور مداوم آب آبخوان شور شده و در نتیجه از کیفیت آن کاسته شود. ضمن این‌که افزایش بهره‌برداری از آبخوان و تخلیه بیش از حد آن، می‌تواند این آلودگی را تسریع بخشد.

در سال‌های اخیر به دلیل آلودگی هوا در شهرهای بزرگ، به خصوص در شهرهایی که به طور غیر اصولی گسترش یافته‌اند و مسایل عدیده‌ای مانند ترافیک و ازدیاد جمعیت را به وجود آورده‌اند، مانند شهرهای تهران، مشهد، اصفهان، تبریز و... پس از بارندگی‌های طولانی، این آلودگی‌ها به همراه آب برگشتی ناشی از بارندگی به آب زیرزمینی رسیده و در سطح آن پخش می‌شود. این نوع آلودگی به دلایل وجود عناصر شیمیایی خاص، در صورتی که سطح آبخوان نزدیک به سطح زمین باشد، آبخوان را سریعا تحت تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به این‌که در اکثر شهرهای بزرگ بخشی از آب شرب و یا اکثریت آن توسط آب زیرزمینی تامین می‌شود، لذا باعث کاهش کیفیت آب آبخوان شده و برای سلامتی انسان خطرناک می‌باشد.

۳-۱-۲- آلودگی متمرکز یا موضعی یا آلودگی با منبع نقطه‌ای[1]

برخلاف آلودگی‌های غیرمتمرکز و توزیعی، آلودگی‌های موضعی بر اثر وجود منبع آلاینده نقطه‌ای، به طور تدریجی آبخوان را آلوده کرده و فرآیند عملکرد آن به صورت ورود آلودگی از نقطه آلاینده به سمت آبخوان می‌باشد.

در این مورد شاید بتوان یکی از آلاینده‌های اصلی که از زمان‌های بسیار دور در اغلب شهرها و روستاهای ایران رایج است را سامانه دفع فاضلاب خانگی توسط چاه‌های جذبی و نشت آب آلوده از آن به داخل آبخوان دانست. به خصوص در مناطق پرجمعیت، این نوع آلودگی از آلاینده‌های اصلی آبخوان محسوب می‌شود. گرچه در حال حاضر پروژه‌های فاضلاب شهری در بعضی از شهرهای بزرگ در ایران در دست مطالعه و اجرا می‌باشد ولی به دلیل طولانی بودن اجرای آن و همچنین گسترش بی‌رویه محدوده شهری، به سختی می‌توان شهری را به طور کامل از نظر شبکه فاضلاب پوشش داد. در نتیجه همیشه آبخوان‌های شهری در معرض خطر آلودگی‌های چاه‌های فاضلاب می‌باشند. این آلودگی با این‌که از نظر نوع سامانه آن، جز آلودگی متمرکز و نقطه‌ای محسوب می‌شود، ولی در جایی که تعداد زیادی از این نقاط وجود داشته و نوع آلاینده نیز یکسان باشد می‌توان این آلودگی را از نوع توزیعی نیز در نظر گرفت.

علاوه بر چاه‌های فاضلاب خانگی، در سال‌های اخیر با روند صنعتی شدن بعضی از شهرها مانند اراک، یزد، تبریز، اصفهان، قزوین ...، پساب‌های صنعتی کارخانجات از طریق چاه‌های فاضلاب به داخل آبخوان هدایت می‌شود. این کار متاسفانه به علت عدم نظارت دقیق به وضعیت دفع پساب‌های کارخانجات روزبه‌روز در حال گسترش بوده و واضح و آشکار است که ادامه روند آلودگی به خصوص آلودگی‌های صنعتی خسارات شدیدی به پیکره کیفی آبخوان وارد کرده و در نتیجه پیامدهای منفی زیست محیطی را به وجود خواهد آورد.

1- Point source pollution

Septic Tank ها را نیز می‌توان از نوع آلودگی‌های موضعی دانست. این نوع مخازن کوچک که اخیرا در بسیاری از برج‌های ساختمانی و مجتمع‌های مسکونی در شهرهای بزرگ به منظور محلی برای انباشتن فاضلاب احداث می‌شوند، قاعدتا باید نفوذناپذیر بوده تا بتواند هدف نهایی از احداث آن را برآورده کند. با این وجود با توجه به نوع و فرهنگ بساز- بفروشی در جامعه به منظور کسب درآمد بیش‌تر و سریع‌تر، هیچ‌گونه تضمینی جهت اجرای کامل و فنی این نوع مخازن کوچک وجود ندارد، لذا در مواقعی به عنوان یک منبع آلاینده می‌تواند عمل کند.

از نوع آلاینده‌های متمرکز آبخوان، می‌توان مخازن کوچک سطحی را که به طور مثال برای ذخیره کردن مواد نفتی احداث می‌شوند، نام برد. این‌گونه مخازن سطحی کوچک[1]، ممکن است جایگاهی برای انباشتن زباله‌های اتمی و سایر مواد آلاینده باشد. با اینکه فرآیند پدیده نشت از این نوع مخازن به حرکت آلودگی به سمت آبخوان بسیار کند صورت می‌گیرد، به طور کل در اثر گذشت سالیان متوالی، این نوع آلودگی می‌تواند در مناطقی با آب زیرزمینی کم‌عمق ظاهر شده و عوامل بسیار خطرناکی را برای انسان به وجود آورد.

در بعضی از مناطق و کشورها، ابتدا مخازنی ذخیره‌ای را در اعماق زمین ایجاد می‌کنند[2] و سپس از طریق چاه‌های تزریق، مواد آلوده صنعتی را به این مخازن زیرزمینی هدایت می‌کنند. این مخازن به علت این‌که مستقیما و از سطوح جانبی مختلف در ارتباط با خاک هستند، لذا می‌توانند نقش بزرگی در آلودگی آبخوان ایفا کنند.

همان‌گونه که ذکر گردید، در اکثر موارد، آلودگی‌ها توسط انسان به آبخوان انتقال داده می‌شود و به عبارت دیگر می‌توان بیان داشت که اکثریت آلودگی‌های متمرکز، به طور مصنوعی انجام می‌شود. در بعضی از مواقع، در اثر وقوع حوادث غیرمترقبه مانند زلزله، حرکات تکتونیکی داخل زمین شکاف‌هایی به وجود آید که آلودگی را از یک محل به محل دیگر منتقل می‌کند که این امر ممکن است به صورت موضعی و یا توزیعی صورت پذیرد.

۳-۱-۳- آلودگی خطی

علاوه بر دو نوع سامانه آلاینده توزیعی و موضعی، می‌توان آلودگی خطی را نیز نام برد. این نوع آلودگی زمانی رخ می‌دهد که رودخانه‌ای آلوده است (چه از نظر شوری و چه به عنوان دریافت‌کننده پساب کارخانجات و یا فاضلاب شهری) مانند رودخانه شور استان مرکزی، رودخانه قشلاق که هرزآب سنندج به آن اضافه می‌شود و یا رودخانه کارون در حوالی شهر اهواز که دریافت‌کننده فاضلاب شهری و پساب‌های کارخانجات می‌باشد و یا نهر فیروزآباد در جنوب تهران که کلیه هرزآب‌های شهری و رواناب سطحی شهر تهران را دریافت می‌کنند. در این صورت در مسیر رودخانه به علت به وجود آمدن پدیده هیدرولیکی تداخل رودخانه ـ آبخوان[3] مرتبا آبخوان به صورت خطی در معرض آلودگی قرار می‌گیرد.

در سال‌های اخیر، در بعضی از شهرهای ایران، به دلیل رهایی از فاضلاب کارخانجات و یا حتی هرزآب شهری هرزآب‌ها به داخل پوکه قنات‌های خشک و مترو هدایت شده و در طی عبور در مسیر قنات، آبخوان را آلوده می‌کنند.

1- Land fills
2- Burial
3- River–Aquifer interaction

از دیگر حالات آلودگی خطی آبخوان، می‌توان نشت آلودگی از طریق زهکش‌ها در پروژه‌های زهکشی را نام برد. زهکش‌ها که در حالت معمولی به علت بالا بودن سطح آب احداث می‌شوند، تا با تخلیه آب محیط را برای کشاورزی مساعد کنند و در اکثر مواقع دریافت کننده آب آلوده ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و به‌کارگیری مواد شیمیایی می‌باشند. از طرف دیگر در خاک‌های شور، مقدار آبی را که به آب آبیاری اضافه کرده تا وظیفه آبشویی خاک را انجام دهند نیز به این زهکش‌ها منتقل می‌شود[1]. در این‌صورت آب زهکش‌ها علاوه بر مواد شیمیایی کشاورزی، به شوری نیز آلوده می‌باشند که در مسیر خود تا رسیدن به حوضچه‌های تبخیری (در صورت وجود) و یا رودخانه در ارتباط با آبخوان قرار گرفته و در نتیجه این آلودگی به آبخوان منتقل می‌شود.

از دیگر آلاینده‌های خطی می‌توان به پدیده تداخل آب شور و شیرین[2] اشاره نمود. این نوع آلودگی خطی به صورت قائم و منحنی‌وار است و نه به صورتی که در مورد رودخانه و زهکش‌های حاوی آب آلوده گفته شد.

پدیده تداخل آب شور و شیرین یکی از مشکلات اساسی در آبخوان‌های ساحلی دنیا می‌باشد. به دلیل فراهم بودن امکانات زندگی و شغلی در بنادر و سواحل و در نتیجه تراکم جمعیت در آن، تامین آب شرب شهرهای ساحلی به صورت یک مشکل مهم بروز نموده است. باتوجه به اینکه تامین آب در این مناطق اکثرا توسط آب زیرزمینی صورت می‌گیرد، لذا بهره‌برداری بیش از حد[3]، از آبخوان باعث تشدید پدیده تداخل[4] شده و مرتبا پیش‌روی جبهه شوری به سمت آبخوان شیرین ساحل صورت می‌گیرد. بدیهی است تداوم این مساله، باعث از دست رفتن تدریجی منابع آب شیرین در شهرهای ساحلی خواهد شد.

از مناطق حاد متاثر از این پدیده را در ایران، می‌توان دشت شبستر واقع در ساحل شرقی دریاچه ارومیه، اطراف دریاچه‌های مرکزی به خصوص در حاشیه خطاالقعر کویرها، سواحل دریای خزر و سواحل جنوبی ایران نام برد. در بعضی از مناطق پیش‌روی شوری به حدی بوده که باعث خسارات جبران‌ناپذیری به بخش کشاورزی و باغات و در نتیجه به بار آمدن مسایل اقتصادی و اجتماعی شده است.

در کویرهای مرکزی که به عنوان دریافت‌کننده کلیه جریانات سطحی و زیرزمینی دشت عمل می‌کنند، در سالیان گذشته گرادیان هیدرولیکی از اطراف به سمت دریاچه و مرکز کویر بوده، در سال‌های اخیر به علت عدم تغذیه کافی و تخلیه و بهره‌برداری زیاد از آبخوان، گرادیان هیدرولیکی از سمت کویر به سمت مناطق کشاورزی معکوس شده و در نتیجه احتمال تداخل آب شور و شیرین وجود دارد. گرچه یکی از عوامل پایین آمدن کیفیت آب زیرزمینی این‌گونه دشت‌ها، تشکیلات زمین‌شناسی منطقه نیز می‌باشد.

با توجه به مسایل فوق‌الذکر، بر اساس نوع آلودگی آبخوان باید برنامه‌ریزی مناسبی جهت حفاظت از آبخوان از منابع آلاینده صورت گیرد.

۳-۱-٤- اهداف مدل‌سازی کیفی آبخوان

معمولا قبل از شروع مدل‌سازی کیفی یک آبخوان، باید هدف از مدل‌سازی روشن باشد. به این صورت که از ابتدا مشخص باشد که در پایان مدل‌سازی چه انتظاری از مدل وجود دارد و نتایج آن تا چه مقدار می‌تواند، نیازهای مدیریت آبخوان را برآورده کند. به طور کلی می‌توان بیان داشت که مهم‌ترین هدف مدل‌سازی کمی و کیفی یک آبخوان، دست‌یابی به نتایجی جهت مدیریت آبخوان می‌باشد. این مدیریت با توجه به نوع آلاینده‌های توزیعی، موضعی و خطی و روند آلودگی نسبت به زمان و جبهه پیش‌روی آلودگی

1- Leaching requirement
2- Sea Water intrusion
3- Over–Exploitation
4- Intrusion

متفاوت می‌باشد. از طرف دیگر برنامه‌ریزی از حفاظت از چاه‌های بهره‌برداری به طور عام و یا تعدادی از چاه‌های بهره‌برداری تامین آب شرب به طور خاص می‌تواند در ضمره اهداف مدل کیفی باشد. ضمن اینکه تصمیم‌گیری در مورد ارائه راهکارهایی جهت رفع آلودگی[1] و طراحی شبکه چاه‌های نمونه‌برداری کیفی[2] نیز می‌تواند با استفاده از نتایج مدل کیفی صورت پذیرد.

متاسفانه بعضا مشاهده می‌شود که مدل‌سازی بدون هدف خاصی انجام می‌شود و منظور از مدل‌سازی دست‌یابی به نتیجه مشخصی نیست. بدیهی است که در این صورت دقت لازم جهت انجام مراحل مختلف مدل‌سازی صورت نگرفته و در پایان گزارش به جز کلی‌گویی چیز دیگری نگاشته نمی‌شود.

به طور خلاصه می‌توان اهداف مدل‌سازی کیفی را به صورت زیر برشمرد:

- تحقیقاتی

انتظار از مدل‌سازی در کارهای تحقیقاتی، صرفا دست‌یابی به یک‌سری پارامترهای مدل و همچنین امکان شبیه‌سازی سامانه با روابط ریاضی جدید می‌باشد و توقع کاربردی شدن آن بلافاصله پس از اتمام تحقیقات نمی‌باشد. ضمن اینکه در صورت آزمون این روابط در مقیاس‌های بزرگ‌تر از آزمایشگاهی و اخذ نتایج مثبت، به‌تدریج این روابط را می‌توان در شبیه‌سازی کیفی آبخوان به‌کار گرفت. همان‌گونه که نرم‌افزارهای فعلی چه از نظر روش حل عددی و چه منظور کردن روابط فیزیکی حاکم بر آبخوان، نتیجه سال‌ها تحقیق در آزمایشگاه و صحرا می‌باشد.

- مطالعاتی

در بعضی مواقع بسته به سیاست سازمان‌های آب و مسوولین اجرایی در یک منطقه، هدف بررسی و پیگیری آلودگی آبخوان در گذشته و ارزیابی وضعیت آلاینده‌ها در حال حاضر می‌باشد. در این مطالعات، هدف اصلی شناخت سامانه کیفی آبخوان است و چگونگی تاثیر آلاینده‌ها از گذشته تا حال باید به صورت عدد، رقم و نقشه ارائه شود.

مقیاس این‌گونه مطالعات، مقیاس طبیعی و محل انجام آن، یک دشت خاص بوده و لازمه آن انجام مطالعات پایه کیفی منطقه در مرحله اول و مدل‌سازی ریاضی آن در گام دوم می‌باشد.

- مدیریتی

هدف دیگر و شاید مهم‌ترین هدف از تهیه مدل ریاضی کیفی یک آبخوان در یک منطقه، پیش‌بینی روند آلودگی و چگونگی تاثیر آلاینده‌های مختلف با نحوه بهره‌برداری می‌باشد. در این‌گونه موارد باتوجه به تصمیم‌گیری‌های گوناگونی که در مورد بهره‌برداری و یا تغذیه آبخوان اعمال می‌شود، عکس‌العمل آن برروی کیفیت آبخوان مورد بررسی قرار می‌گیرد. باتوجه به این هدف، می‌توان وضعیت آینده آب زیرزمینی یک منطقه را از نظر کیفی پیش‌بینی کرد.

1-Decontamination
2- Monitoring

با توجه به این اهداف، بدیهی است در صورتی می‌توان بهترین نتیجه را از مدل‌سازی کیفی آبخوان اخذ نمود که دقیقا در ابتدای امر مشخص شود که مشکل آبخوان از نظر کیفی چیست و هدف از مدل‌سازی چیست؟ و سپس در همین راستا فرآیند مدل‌سازی انجام شود.

با پیگیری اهداف از پیش تعیین شده در مدل‌سازی، به سهولت می‌توان نتایج اخذ شده از مدل را ارزیابی کرده و تصمیمات لازم را در مورد مدیریت آبخوان انجام داد.

۳-۱-۵- فرآیند مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی

به طور کلی همانطوری که قبلا ذکر گردید قبل از شروع تهیه مدل ریاضی کیفی آب‌های زیرزمینی، ابتدا باید هدف از تهیه مدل مشخص شود. به خصوص آن‌که پس از تهیه مدل، چگونه می‌توان از این مدل جهت مدیریت کیفی آبخوان استفاده کرد. بنابراین اولین گام در فرآیند مدل‌سازی، تعریف اهداف و در پی آن تهیه مطالعات پایه کیفیت آبخوان مورد نظر می‌باشد. مهم‌ترین کمکی که شناخت اهداف می‌تواند در روند مدل‌سازی ارائه کند، در نظر گرفتن جزییات و دقت کار بوده و این‌که با چه درجه از دقت، مدل‌سازی باید انجام گیرد. مثلا داده‌های مورد نیاز، شبکه‌بندی منطقه و انتخاب روش مناسب حل معادلات و یا مدل مناسب برای منطقه، کاملا متاثر از اهداف مدل می‌باشند.

در گام دوم با توجه به این‌که پیش نیاز مدل کیفی آبخوان، تهیه مدل کمی و یا مدل ریاضی جریان در آب‌های زیرزمینی می‌باشد، لذا در این گام، مدل کمی باید تهیه شود. این مدل به عنوان منبعی از اطلاعات موردنیاز در مدل کیفی مانند سرعت جریان و داده‌های بیلان آب در هر یک از گره‌های مدل عمل می‌کند. به همین جهت مدل و همچنین گزارش فنی مدل ریاضی جریان باید با دقت کامل تهیه شده و در دسترس باشد تا بتوان از آن به سهولت در روند تهیه مدل کیفی استفاده کرد.

پس از این مرحله، مدل مفهومی‌آلودگی آبخوان باید تهیه شود. این مدل با توجه به آنچه در طبیعت وجود دارد، مانند مولفه‌های جریان، فرآیند حمل مواد، زمین‌شناسی و خصوصیات طبیعی آبخوان، قاعدتا باید طوری تهیه شود که معرف کاملی و یا حداقل نسبتا کامل از سامانه باشد. در نتیجه، تهیه مدل مفهومی‌نیز بر اساس مطالعات پایه کیفیت آب زیرزمینی صورت می‌گیرد. مدل مفهومی به طور خلاصه می‌تواند شناخت اولیه و مناسبی از سامانه کیفی آبخوان ارائه دهد. پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان، ضرایب پخشیدگی نوع آلاینده‌ها و ورودی و خروجی مواد محلول در سامانه آبخوان، از مواردی هستند که با استفاده از مطالعات پایه، در تهیه مدل مفهومی و بر اساس آن در تهیه مدل ریاضی می‌تواند بسیار موثر باشد.

آنچه در این مرحله و حتی در مرحله انجام مطالعات پایه باید به آن دقت کرد، بررسی داده‌های موجود و کیفیت آن و انجام آنالیزهای آماری مناسب جهت مطمئن شدن از ارقامی است که بعدها به عنوان ورودی‌های مدل نقش موثری دارند، این مرحله از مراحل حساس و وقت‌گیر فرآیند مدل‌سازی می‌باشد.

پس از انجام این مرحله، در گام بعدی معادلات پایه آلودگی آب‌های زیرزمینی که مبنای مدل ریاضی می‌باشد، باید مورد بررسی قرار گیرد که این معادلات، بر اساس تحقیقاتی که در مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی دنیا در مورد آلودگی انجام شده است، تهیه شده‌اند و هر یک از معادلات در نظر گرفته شده در یک مورد خاص، حاصل سال‌ها تلاش اکیپ‌های مختلف تحقیقاتی می‌باشد. با این وجود در این مرحله شخص مدل‌ساز باید شناخت کاملی نسبت به معادلات آلودگی در آبخوان را داشته باشد.

در گام بعدی با توجه به مدل مفهومی و معادلات حاکم بر جریان کیفی آبخوان و همچنین اهداف مدل‌سازی، در صورت امکان و داشتن بودجه، وقت کافی و اکیپ قوی و توانا به بسط و توسعه یک نرم‌افزار پرداخته می‌شود. نرم‌افزاری که بتواند نیازهای مدل‌سازی را تامین کند. در اکثر مواقع به دلیل عدم وجود شرایط فوق و با توجه به اینکه نرم‌افزارهایی با قابلیت و کارآیی مناسب وجود دارند، لذا می‌توان از آنها استفاده کرد. بنابراین در این مرحله، از بین مدل‌های موجود، باید نرم‌افزار مناسبی جهت مدل‌سازی انتخاب شود.

پس از انتخاب مدل، بر اساس طبیعت سامانه آبخوان و همچنین اهداف مدل‌سازی منطقه به شبکه‌های کوچک تقسیم می‌شود. پس از آن شرایط مرزی با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی، نحوه انتقال مواد، شرایط اولیه (برای مدل‌سازی در حالت غیرماندگار) تعیین می‌شود. با معلوم بودن موارد فوق، آمار و اطلاعات، پارامترهای مورد نیاز به مدل کیفی داده می‌شود.

پس از اینکه این مرحله با دقت و حوصله به نحو احسن انجام گرفت، مدل آماده اجرا و راه‌اندازی می‌باشد. بنابراین در گام بعدی مدل اجرا می‌شود و پس از اجرا، تنظیم و تطبیق پارامترهای مدل با آبخوان موردنظر صورت می‌گیرد. بدیهی است که این مرحله نیز در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار انجام می‌شود. در ادامه این گام، با توجه به اهمیت تعیین اثر هر یک از پارامترها در نتایج مدل، انجام آنالیز حساسیت ضروری و لازم می‌باشد. این کار به خصوص در مدل‌های کیفی به دلیل عدم اطمینان از پارامترها و ضرایب موردنیاز در مدل، از اهمیت بالایی برخوردار است که می‌تواند تاثیر زیادی بر روی نتایج حاصل از مدل داشته باشد و در نتیجه زمانی که بخواهیم از مدل کیفی در جهت مدیریت و تصمیم‌گیری در مورد آبخوان استفاده شود، انجام آنالیز حساسیت و آگاهی از اثر پارامترهای مختلف بر روی مدل لازم است.

پس از تحلیل حساسیت مدل تهیه شده باید صحت‌سنجی شود. به این صورت که بعد از هر سال مدل، برای سه سال و یا حداقل یک سال با گام زمانی ماهانه و داده‌های مشاهده‌ای ارزیابی شود. در صورتی که ارزیابی مثبت بود این مدل، آماده استفاده جهت مدیریت آلودگی و پیش‌بینی اثرات آلاینده‌ها در آینده آبخوان می‌باشد که در سال‌های آینده با وجود آمار و اطلاعات بیش‌تر، مدل را می‌توان به روز کرده و از آن جهت کاربردهای مدیریتی استفاده کرد.

در انتهای این بخش و پس از به دست آوردن نتایج و بحث و تفسیر آن، گزارش فنی مدل همراه نقشه‌ها باید تهیه شود.

روند مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی در شکل (۳-۱) ارائه شده است.

شکل ۳-۱- فلوچارت فرآیند مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی

۳-۱-٦- تهیه مدل مفهومی

طبق روند مدل‌سازی کیفی، پس از مشخص بودن اهداف مدل و انجام مطالعات پایه در این مرحله تهیه مدل مفهومی به عنوان پیش نیاز مدل ریاضی ضروری است. معمولا در تهیه یک مدل مفهومی، موارد زیر باید مشخص شود:

- فرم هندسی محدوده آبخوان
- نوع تشکیلات زمین‌شناسی آبخوان از نظر همگنی و ناهمگنی
- نحوه بررسی مساله (به صورت یک، دو و یا سه‌بعدی)
- تعیین رژیم جریان به صورت ورقه‌ای و یا متلاطم
- تعیین نوع منبع آلودگی (نقطه‌ای، خطی، توزیعی)

- نوع آلاینده‌ها و نحوه توزیع آن
- بررسی تغییر مکانی و زمانی متغیر حالت (غلظت) در آبخوان
- تغذیه و تخلیه مواد محلول در سامانه کیفی آبخوان
- شرایط مرزی و ارتباطی که از نظر کیفیت، آبخوان، با خارج از محدوده خود دارد.

بدون شک یکی از مهم‌ترین مراحل فرآیند مدل‌سازی، انتخاب مدل مفهومی مناسب با توجه به طبیعت آبخوان می‌باشد. ساده‌نگری بیش از حد به موضوع، منجربه نتایج غیرواقعی و نگرش سخت‌گیرانه، باعث بالا رفتن هزینه مدل‌سازی و نیاز به داده‌های بیش‌تر و به خصوص ایجاد مشکلات عدیده در مرحله تنظیم مدل می‌شود.

بدیهی است که تهیه مدل مفهومی، بستگی به اهداف مدل‌سازی و منابع موجود و آمار و اطلاعات صحرایی دارد. ولی آن‌چه می‌توان بیان داشت، این است که تهیه مدل مفهومی در مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی نسبت به مدل به مراتب مشکل‌تر و پیچیده‌تر از تهیه مدل مفهومی در مدل‌سازی جریان در آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

ذکر این نکته در این‌جا لازم است که مدل مفهومی قاعدتا باید در مقیاس سه‌بعدی تهیه شود ولی به دلیل پیچیدگی فعل و انفعالات شیمیایی در آبخوان و عدم شناخت کامل ما به آنچه در درون یک آبخوان و لایه‌های مختلف آن به خصوص از نظر کیفی می‌گذرد، غالبا این امکان وجود ندارد به خصوص در شرایط ایران و محدودیت آزمایشات ژئوفیزیک، ردیابی آلودگی در آبخوان و نمونه‌برداری کیفی از اعماق مختلف آبخوان تشکیل مدل مفهومی را در مقیاس سه‌بعدی توام با خطا خواهد کرد. از طرف دیگر به دلیل این‌که این مدل، به عنوان راهنما در تهیه مدل ریاضی به‌کار گرفته می‌شود، لذا گاه با تهیه نادرست و ناقص آن باعث ایجاد اشتباه در روند مدل‌سازی خواهد شد. بنابراین در این‌گونه موارد، بهتر است مدل مفهومی در مقیاس دوبعدی تهیه شود ولی اطلاعاتی از چگونگی اثرات شرایط مرزی به طور مثال در محور عمودی (به خصوص وجود آلاینده‌های کشاورزی، شهری و صنعتی) و سنگ کف (در عمق آبخوان) ذکر شود. در مقیاس دوبعدی شاید بهترین پارامتری که بر اساس آن بتوان مدل مفهومی را تهیه کرد، باقیمانده خشک مواد محلول (T.D.S) باشد. در واقع تهیه نقشه مربوط به این پارامتر می‌تواند تا حدود زیادی روند تغییرات کیفی آبخوان را از نظر مکانی نشان دهد.

بدیهی است، در صورتی که منشا آلودگی، به طور مثال یک چاه تزریقی باشد و یا آلودگی آبخوان ناشی از تداخل رودخانه آلوده با آبخوان باشد، در این حالت، تهیه مدل مفهومی به مراتب ساده‌تر از سامانه پیچیده آلاینده‌ها در بعضی از آبخوان‌ها می‌باشد.

در سواحل دریاها و دریاچه‌ها که پدیده تداخل آب شور و شیرین رخ می‌دهد (مانند ساحل دریای خزر، ساحل دریاچه ارومیه، نواحی پست بعضی از کویرهای ایران، دریاچه هامون سابوری در سیستان و...)، شاید بتوان با انجام یک سری اندازه‌گیری‌های کیفی در اعماق مختلف آبخوان با مختصات (z, y, x)، روند پیش‌روی آب شور به سمت آبخوان شیرین در خشکی را ملاحظه کرد که این امر به خصوص در تهیه مدل مفهومی‌می‌تواند، بسیار موثر باشد.

در صورتی که فقط از پارامترهای کیفی، مقدار هدایت الکتریکی (EC) در دسترس باشد، گاه می‌توان با تبدیل EC به T.D.S، پارامتر اخیر را به‌دست آورد.

در شوری‌های بالای آبخوان، این روش نمی‌تواند دقیق باشد و لذا بهتر است که پارامتر باقیمانده خشک (T.D.S)، به طور مستقل نمونه‌برداری شود و در مکان‌های مختلف می‌توان نقشه هم T.D.S را رسم کرده و از آن در تهیه مدل مفهومی استفاده کرد.

بدیهی است در صورتی‌که مشکل منطقه، به طور مثال افزایش نیترات (به خصوص در مناطق کشاورزی) و یا افزایش فلزهای سنگین (در مناطق شهری و صنعتی) باشد، مساله به طورکلی فرق خواهد کرد و ارقام و نقشه توزیع مکانی و زمانی مربوط به آن آلاینده خاص (به طور مثال نیترات و یا آرسنیک)، باید به عنوان نقشه مبنا جهت تهیه مدل مفهومی به‌کار گرفته شود.

پس از تهیه مدل مفهومی، لازم است معادلات پایه در آلودگی آب‌های زیرزمینی مورد بحث قرار گیرد که در فصل دوم، به طور مفصل معادلات و روابط ریاضی پدیده انتقال مواد محلول در سامانه آب‌های زیرزمینی ارائه شد.

۳-۲- پدیده انتقال املاح و معادلات پایه کیفیت آب‌های زیرزمینی

فرآیند حرکت مواد محلول در آب‌های زیرزمینی توسط سه عامل اساسی زیر انجام می‌شود:

الف: انتقال مواد توسط حرکت آب زیرزمینی

ب: پخشیدگی مواد محلول

ج: ورودی و خروجی آلاینده‌ها در محدوده آبخوان و در صورت وجود آلاینده‌هایی چون رادیواکتیو یا نفتی و یا غیره بدیهی است که هر یک از موارد خاص نیز به این سه عامل فوق اضافه خواهد شد.

انتقال مواد در مدل‌های ریاضی در آلودگی آب‌های زیرزمینی توسط چاه پمپاژ و یا چاه تزریق و یا جریان طبیعی و مصنوعی آب به آبخوان صورت می‌گیرد. معادله بیلان کیفی را در یک آبخوان باتوجه به سه عامل فوق، می‌توان به صورت زیر نوشت:

انتقال و جابه‌جایی مواد

پخشیدگی مواد

ورودی و خروجی مواد محلول در محدوده آبخوان

تغییرات غلظت در آبخوان

معادله اصلی انتقال مواد در آبخوان براساس تلفیق معادل بقای جرم (پیوستگی)، معادله بقای حرکت (مومنتم) و معادله بقای انرژی (برنولی) به‌دست می‌آید. این معادله در سامانه سه‌بعدی آبخوان و در حالت غیرماندگار به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}(v_i C)+\frac{q_s}{\theta}C_s+\sum_{k=1}^{N}R_k \qquad (۱-۳)$$

که در آن:

C = غلظت مواد محلول در آب زیرزمینی (ML^{-3})

t = زمان (T)

xi = جهات مختلف x و y و z در سامانه مختصات کارتزینی (L)

Dij = ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی (L^2T^{-1})

vi = سرعت حرکت آب زیرزمینی (LT^{-1})

qs = بده ورودی و خروجی در واحد حجم، ورودی‌ها، مثبت وخروجی‌ها، منفی، (LT^{-1})

Cs = غلظت آب ورودی و خروجی (ML^{-3})

θ = تخلخل (بدون بعد)

$\sum_{K=1}^{N} R_K$ = ترم واکنش شیمیایی ($ML^{-3}T^{-1}$)

ترم واکنش شیمیایی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_{K=1}^{N} R_K = -\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} - \lambda(C + \frac{\rho_b}{\theta}\overline{C}) \qquad (۲-۳)$$

که در آن:

ρ_b = چگالی خاکدانه ها (ML^{-3})

$\overline{C}$ = غلظت مواد جذب شده در محیط متخلخل (MM^{-1})

λ = ضریب ثابت فروپاشی آلاینده رادیواکتیو یا ضریب ثابت تبادل شیمیایی (T^{-1})

در صورتی‌که بخش اول سمت راست معادله (۳-۲) را به صورت زیر بنویسم:

$$\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} = \frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial C}{\partial t}\frac{\partial \overline{C}}{\partial C} \qquad (۳-۳)$$

و معادلات (۳-۲) و (۳-۳) را در معادله (۳-۱) جاگذاری کنیم، معادله به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}(v_i C) + \frac{q_s}{\theta}C_s + \frac{\rho_b}{\theta} + \frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \overline{C}}{\partial C}\frac{\partial C}{\partial t} - \lambda\left(C + \frac{\rho_b}{\theta}\overline{C}\right) \qquad (۴-۳)$$

در صورتی‌که ترم چهارم سمت راست معادله (۳-۴) را به سمت چپ منتقل کرده و فاکتور تاخیر R را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$R = 1 - \frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \overline{C}}{\partial C} \qquad (۵-۳)$$

معادله اساسی مدل‌های کیفی آب‌های زیرزمینی حاصل خواهد شد.

$$R\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}(v_i C) + \frac{q_s}{\theta}Cs - \lambda\left(C + \frac{\rho_b}{\theta}\overline{C}\right) \qquad (۶-۳)$$

از طرف دیگر معادله انتقال مواد با معادله جریان آب زیرزمینی از طریق رابطه زیر مرتبط می‌باشد:

$$v_i = -\frac{K_{ii}}{\theta}\frac{\partial h}{\partial x_i} \qquad (۷-۳)$$

K_{ii} = تانسور هدایت هیدرولیکی (LT^{-1})

h = پتانسیل هیدرولیکی (L)

ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان در معادله سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(K_{ii}\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)+q_s=S\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۸-۳)$$

S = ضریب ذخیره (بدون بعد)

یادآوری می‌شود که پارامتر ضریب هدایت هیدرولیکی K_{ii} در سامانه سه‌بعدی دارای ۹ مولفه می‌باشد.

۳-۲-۱- پدیده انتقال

ترم دوم سمت راست معادله (۳-۶)، $\frac{\partial}{\partial x_i}(v_i C)$ در واقع همان ترم انتقال است که نشان دهنده حرکت و انتقال مواد محلول با سرعت حرکت آب زیرزمینی می‌باشد.

در بسیاری از مسایل آلودگی آب‌های زیرزمینی به دلیل حرکت آب آبخوان، پدیده انتقال و جابه‌جایی مواد محلول پیش می‌آید. برای تعیین مقدار این پدیده، عدد بدون بعد پکلت[1] مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عدد به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$P_e=\frac{|v|L}{D} \qquad (۹-۳)$$

که در آن:

$|v|$ = قدر مطلق سرعت حرکت آب یا نشت (LT^{-1})

L = طول مشخصه که معمولا برابر با عرض شبکه (Δx) انتخابی است (L)

D = ضریب پخشیدگی $(L2T^{-1})$

عدد پکلت در جایی که پدیده انتقال سریع‌تر از پدیده پخشیدگی می‌باشد، مانند مسایل تداخل آب شور و شیرین دارای مقدار عددی بالایی است. در مسایلی که فقط انتقال خالص وجود دارد، مقدار D به سمت صفر میل کرده و در نتیجه عدد پکلت بی‌نهایت می‌شود. ضمن اینکه این عدد به مقدار عرض شبکه (Δx) و یا L در رابطه ۳-۹ نیز بستگی دارد.

۳-۲-۲- پخشیدگی

- مکانیسم پخشیدگی

پخشیدگی در آب‌های زیرزمینی در واقع نشانگر، پخش شدن یک ماده آلوده در یک منطقه با سرعت حرکت آب زیرزمینی می‌باشد. به طورکلی پخشیدگی، یک پدیده مکانیکی است که در نتیجه حرکت آب در خاک در یک مقیاس میکرو رخ می‌دهد و با پخشیدگی مولکولی و تغییرات غلظت همراه است. در صورتی‌که حرکت آب زیرزمینی بسیار کم باشد می‌توان از پخشیدگی مولکولی صرف‌نظر کرد.

در معادله (۳-۱۰)، ترم پخشیدگی به صورت زیر تفکیک می‌شود:

1- Peclet number

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right)=D_x\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+D_y\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}+D_z\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \qquad (۱۰-۳)$$

اگر چه مفهوم مکانیسم پخشیدگی ساده و قابل فهم بنظر می‌رسد، ولی پدیده پخشیدگی در یک مدل کیفی، هنوز به عنوان موضوع تحقیقاتی در اکثر دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی دنیا مطرح می‌باشد. با اینکه نگرش‌های مختلفی از این تحقیقات حاصل شده است که حتی فرم ظاهری این ترم را تحت تاثیر قرار می‌دهد، با این وجود معادله (۳-۶) هنوز به عنوان معادله اساسی آلودگی آب‌های زیرزمینی به‌کار می‌رود.

- ضریب پخشیدگی

ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی در یک محیط متخلخل یکنواخت دارای مولفه‌های زیر می‌باشد:

$$D_{xx}=\alpha_L\frac{v_x^2}{|v|}+\alpha_T\frac{v_y^2}{|v|}+\alpha_T\frac{v_z^2}{|v|}+D^* \qquad (۱-۱۱-۳)$$

$$D_{yy}=\alpha_L\frac{v_y^2}{|v|}+\alpha_T\frac{v_x^2}{|v|}+\alpha_T\frac{v_z^2}{|v|}+D^* \qquad (۲-۱۱-۳)$$

$$D_{yy}=\alpha_L\frac{v_z^2}{|v|}+\alpha_T\frac{v_x^2}{|v|}+\alpha_T\frac{v_y^2}{|v|}+D \qquad (۳-۱۱-۳)$$

$$D_{xy}=D_{yx}=(\alpha_L-\alpha_T)\frac{v_x v_y}{|v|} \qquad (۴-۱۱-۳)$$

$$D_{xz}=D_{zx}=(\alpha_L-\alpha_H)\frac{v_x v_z}{|v|} \qquad (۵-۱۱-۳)$$

$$D_{yz}=D_{zy}=(\alpha_L-\alpha_H)\frac{v_y v_z}{|v|} \qquad (۶-۱۱-۳)$$

که در آن:

α_L = پخشیدگی طولی (L)

α_T = پخشیدگی عرضی (L)

D^* = ضریب پخشیدگی مولکولی موثر (L^2T^{-1})

v_x، v_y، v_z = مولفه‌های سرعت در جهات x،y،z (LT^{-1})

$|v|$ = قدر مطلق سرعت (LT^{-1}) که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

قابل ذکر است که تانسور پخشیدگی ($|v|=(v_x^2+v_y^2+v_z^2)^{1/2}$) که به صورت پخشیدگی‌های طولی و عرضی در معادلات فوق تعریف شده‌اند، برای محیط همگن معتبر است و برای محیط غیرهمگن، باید ۵ پارامتر پخشیدگی در نظر گرفته شود. در طبیعت کارهای کاربردی مدل‌سازی کیفیت آب زیرزمینی، عملا در نظر گرفتن این مقدار پارامتر پخشیدگی میسر نیست. براین اساس ضرایب

پخشیدگی به همان دو ضریب طولی و عرضی کاهش یافته و فرض می‌شود که مقادیر این ضرایب در محیط غیرهمگن نیز صادق است.

در بعضی از مدل‌ها، به منظور برطرف کردن این مشکل، ضریب پخشیدگی عرضی، خود به دو پارامتر پخشیدگی عرضی افقی (α_{TH}) و پخشیدگی عرضی عمودی (α_{TV}) به صورت زیر تفکیک می‌شود:

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \qquad (۱-۱۲-۳)$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \qquad (۲-۱۲-۳)$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_y^2}{|v|} + D^* \qquad (۳-۱۲-۳)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_x v_y}{|v|} \qquad (۴-۱۲-۳)$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_x v_z}{|v|} \qquad (۵-۱۲-۳)$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_y v_z}{|v|} \qquad (۶-۱۲-۳)$$

بدیهی است که در صورتی‌که ضرایب پخشیدگی عرضی افقی و عمودی یکسان باشند، در این‌صورت معادلات (۳-۱۲) به صورت معادلات (۳-۱۱) ساده خواهد شد.

۳-۲-۳- ورودی و خروجی‌ها

سومین ترم از معادله اصلی، $\frac{q_s}{\theta} C_s$، در واقع بیانگر توده مواد محلول ورودی و خروجی در محیط شبیه‌سازی کیفی یک آبخوان است.

به طور کلی در آلودگی آب‌های زیرزمینی، ورودی و خروجی توده مواد محلول یا به صورت نقطه‌ای و یا به صورت توزیعی (پخشی) ظاهر می‌شوند. در یک منطقه وسیع مثلا چاه تزریق (چاه‌های خانگی، چاه‌های فاضلاب، کارخانجات و...)، زهکش‌ها (مثلا زهکش‌هایی که بر اثر نیاز آبشویی خاک‌ها فعال شده و دارای آبی با کیفیت بسیار پایین هستند که پس از نفوذ به آبخوان، باعث کاهش کیفیت آب آبخوان می‌شوند) و رودخانه‌ها (به خصوص رودخانه‌هایی که فاضلاب شهرها و پساب کارخانجات به آن ریخته و یا پس از عبور از سازند خاصی، دارای کیفیت نامطلوبی می‌شوند)، را می‌توان ورودی‌های نقطه‌ای و یا خطی در نظر گرفت. ضمن این‌که تغذیه در سطح آبخوان (آب آبیاری همراه با کود شیمیایی)، تغذیه طبیعی (آبراهه‌های مشرف به دشت‌ها پس از عبور از سازندهای مارنی و آهکی و تبادل شیمیایی با آن،مواد را حل کرده و در سطح آبخوان پخش می‌کنند) و یا تخلیه (به صورت تبخیر و تعرق در آبخوان‌هایی که سطح آب آن به زمین نزدیک است)، به عنوان ورودی و خروجی بخشی ظاهر می‌شوند.

برای منابع ورودی، لازم است که مقدار غلظت آب زیرزمینی مشخص شود ولی برای منابع خروجی، مقدار غلظت خروجی را همان غلظت آبخوان (در مرزهای خروجی) در نظر می‌گیرند. البته به‌جز شرایط خاص که غلظت خروجی خیلی با مقدار غلظت آبخوان

متفاوت باشد. به طور مثال مرسوم است که مقدار غلظت آب تبخیر شده را برابر با غلظت آب شیرین در نظر بگیرند که این مغایر با غلظت آبخوان در حالت طبیعی می‌باشد.

۳-۲-٤- واکنش شیمیایی

معمولا عکس‌العمل شیمیایی در مدل‌های کیفی آب زیرزمینی به صورت جذب خطی و یا غیرخطی مواد شیمیایی در آبخوان پدید می‌آید.

به طور کلی پدیده جذب در فرآیند انتقال بین انحلال ماده آلوده در آب زیرزمینی (فاز تحلیل) و جذب ماده آلوده در محیط متخلخل (فاز جذب)، به وجود می‌آید. معمولا فرض می‌شود که شرط تعادل بین غلظت فازهای تحلیلی و جذبی وجود دارد و عکس‌العمل جذب، سریع بوده و تقریبا با سرعت حرکت آب همخوانی دارد. ارتباط غلظت‌های فازهای تحلیلی و جذبی را اصطلاحا جذب ایزوترم می‌گویند. جذب ایزوترمی معمولا در مدل‌های انتقال و آلودگی با به‌کارگیری فاکتور تاخیر اعمال می‌شود. در بعضی از مدل‌ها، سه نوع جذب ایزوترمی به صورت خطی، فراندلیچ[1] و لانگمیر[2] در نظر گرفته می‌شود.

جذب ایزوترم زمانی خطی فرض می‌شود که غلظت جذبی ($\overline{C}$) مستقیما به غلظت محلول (C) تبدیل شود:

$$\overline{C} = K_d C \qquad (۱۳-۳)$$

که در آن K_d ضریب توزیع $(L^3M^{-1})^a$ می‌باشد. فاکتور تاخیر نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = 1 + \frac{\rho_b \partial \overline{C}}{\theta \partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_d \qquad (۱۴-۳)$$

ایزوترم فراندلیچ، یک جذب غیرخطی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\overline{C} = K_c C^a \qquad (۱۵-۳)$$

که در آن:

K_f = ضریب ثابت فراندلیچ

a = توان فراندلیچ (بدون بعد)، می‌باشد.

ضرایب K_f و a ضرایب تجربی هستند.

بدیهی است که در صورتی‌که a برابر با یک شود، ایزوترم فراندلیچ همان ایزوترم خطی می‌باشد. فاکتور تاخیر برای ایزوترم فراندلیچ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \overline{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} a K_f C^{a-1} \qquad (۱۶-۳)$$

از طرف دیگر ایزوترم لانگمیر نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

1- Freundlich
2- Langmuir

$$\overline{C} = \frac{K_f . \overline{S}C}{1 + K_f C} \qquad (۱۷-۳)$$

که در آن:

K_t = ضریب ثابت لانگمیر (L^3M^{-1})

$\overline{S}$ = غلظت کل موجود در فاز جذبی (MM^{-1}) می‌باشد.

فاکتور تاخیر در ایزوترم لانگمیر به صورت زیر است:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \overline{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta}\left[\frac{K_t \overline{S}}{(1 + K_t C)^2}\right] \qquad (۱۸-۳)$$

۳-۲-۵- جذب رادیواکتیو

در معادله اصلی انتقال مواد، ترم نشانگر فرسایش توده در $-\lambda\left(C + \frac{\rho_b}{\theta}\overline{C}\right)$ فاز محلول (C) و فاز جذبی (C)، با نسبت ثابت λ می‌باشد. معمولا نسبت ثابت تابعی از نصف عمر مواد رادیواکتیو می‌باشد.

$$\lambda = \frac{(\ln_2)}{t_{1/2}} \qquad (۱۹-۳)$$

به عبارت دیگر مدت زمانی که لازم است تا غلظت باندازه نصف غلظت کل مواد رادیواکتیو برسد را ثابت λ می‌نامند.

۳-۲-٦- شرایط اولیه

همان طوری‌که ذکر گردید، معادله اصلی مدل آلودگی آب‌های زیرزمینی، تغییرات تدریجی غلظت را در آبخوان نشان می‌دهد. با توجه به این معادله که از نوع معادله دیفرانسیل جزیی است برای حل آن، شرایط اولیه لازم می‌باشد. این شرایط در محیط $\forall$ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$C(x, y, z, t) = C^{\circ}(x, y, z) t \geq 0 \qquad (۲۰-۳)$$

$C^{o}(xyz)$ توزیع غلظت اولیه می‌باشد که به عنوان معلومات مساله می‌باشد.

شرایط مرزی

علاوه بر شرایط اولیه، یک معادله دیفرانسیل جزیی در حالت غیرماندگار به شرایط مرزی نیز نیاز دارد تا بتوان به عنوان نقاط شروع کننده، عملیات حل را آغاز کرد. به طورکلی شرایط مرزی در آلودگی آب‌های زیرزمینی به صورت زیر می‌باشد:

- شرط مرزی دیریکله[1] که در آن، غلظت در روی مرز معلوم است.
- شرط مرزی نیومن[2] گرادیان (تغییرات) غلظت در روی مرز معلوم است.

1- Dirichlet
2- Neuman

- تلفیقی از شرایط دیریکله و نیومن که اصطلاحا شرط کشی نامیده می‌شود.

در شرط دیریکله، فرض بر این است که مقدار غلظت معلوم است و مقدار آن در طول گام زمانی مدل تغییری نمی‌کند به صورت:

$$C(x, y, z, t) = C^{\circ}(x, y, z) \qquad (۲۱-۳)$$

که در آن $C^{o}(xyz)$ مقدار غلظت معلوم در روی مرز می‌باشد.

در مدل‌های کیفی، مرز با غلظت معلوم بیانگر این است که یک منبع آلاینده با یک غلظت مشخص به طور مثال در ورودی به محدوده مدل و یا یک منبع دریافت کننده مواد آلوده با غلظت معین در خروجی آبخوان وجود دارد. در اینجا نکته مهم این است که لزوما بار هیدرولیکی ثابت در شبکه مدل‌سازی جریان، شرایط غلظت ثابت را در روی یک مرز به وجود نمی‌آورد و این اتفاق ممکن است، در طبیعت به وجود آید و یا به وجود نیاید.

شرط مرزی نیومن، که نشان‌دهنده این است که تغییرات غلظت در روی مرز مشخص است، به صورت:

$$D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x} = q(x,\ y,\ z,\ t) \qquad t \geq 0 \qquad (۲۲-۳)$$

می‌باشد که در آن $q(x,y,z,t)$ مقدار بده با غلظت مشخصی است که به سامانه وارد و یا از سامانه آب زیرزمینی خارج می‌شود. بدیهی است که در صورتی‌که مرز غیرقابل نفوذ باشد و هیچ‌گونه بده جریان پیدا نکند، $q(x,y,z,t)=0$ خواهد شد.

در شرط سوم، در روی مرز، هم غلظت و هم تغییرات غلظت معلوم می‌باشد، به صورت:

$$D_{ij}\frac{\partial C}{\partial xj} - \nu_i C = g(x,\ y,\ z,\ t) \qquad t \geq 0 \qquad (۲۳-۳)$$

در رابطه اخیر مقدار $g(x,y,z,t)$، در واقع بیانگر بده انتقال و پخشیدگی جریان می‌باشد که در روی یک مرز مشخص می‌باشد. بدیهی است که باز در این مورد نیز در صورتی‌که مرز غیرقابل نفوذ باشد، مقدار $g(x,y,z,t)=0$ خواهد شد.

در ورودی و یا خروجی سامانه آبخوان، معمولا مقدار بده انتقال بر بده پخشیدگی غلبه کرده و معادله (۲-۲۳) به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$-\nu_i C = g(x, y, z, t) \qquad (۲۴-۳)$$

معادله اخیر می‌تواند درمعادله اصلی مدل کیفی آب زیرزمینی، جایگزین ترم ورودی یا خروجی شود.

۳-۲-۷- حل عددی معادلات انتقال و پخش آلودگی در آبخوان

معمولا با سه نگرش اولرین، لاگرانژین و تلفیق اولرین- لاگرانژین انجام می‌شود. در نگرش اولرین فرض براین است که حل عددی براساس شبکه مکانی ثابت در مدل‌سازی انجام شود که از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان روش تفاضل‌های محدود (F.D.M) و روش اجزا محدود (FEM) را نام برد. به این صورت که در هر شبکه، مقدار آلودگی (پارامتر وابسته)، براساس روش‌های عددی و با معلوم بودن، ضرایب و متغیرهای مستقل معادله، در سایر شبکه‌ها به‌دست می‌آید. نگرش اولرین در مدل‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی به دلیل مشکلات کم‌تر و ساده بودن معادلات جریان نسبت به معادلات آلودگی، کاربرد زیادی دارد و نتایج کار هم موفقیت‌آمیز بوده است. در آلودگی، کاربرد این نگرش با خطاهایی از قبیل پخشیدگی عددی و یا نوسانات مصنوعی ناشی از روش حل همراه می‌باشد، ضمن اینکه این‌گونه خطاها را با کوچک‌تر انتخاب کردن شبکه‌ها و یا گام زمانی کوچک تا حدودی می‌توان

برطرف کرد ولی ترجیحا در حل عددی آلودگی، از این روش‌ها کم‌تر استفاده می‌شود. در نگرش لاگرانژین، معادله آلودگی در شبکه مکانی تغییر شکل یافته و یا مختصات تغییر یافته در یک شبکه مکانی ثابت حل می‌شود. به این صورت که برخلاف نگرش اولرین، شبکه‌ها ثابت فرض نمی‌شوند، بلکه امکان تغییر شکل یافتن را دارند. به عبارت دیگر می‌توان بیان داشت که در نگرش اولرین، خصوصیات هر شبکه از نظر کیفی با داشتن ضرایب هیدرودینامیکی آن از طریق عددی حل می‌شود ولی در روش لاگرانژین مسیر حرکت ذره و نه خود ذره آلوده از طریق عددی پیگیری می‌شود تا با داشتن روند پیگیری بتوان مقدار متغیر وابسته را در نقاط مختلف به‌دست آورد. به طور خلاصه در نگرش لاگرانژین انتقال مواد توسط تعداد زیادی ذرات بررسی می‌شود و حل مستقیم معادله جابه‌جایی ـ پخشیدگی انجام نمی‌گیرد. باوجود اینکه نگرش لاگرانژین در تحلیل انتقال ذره آلوده به واقعیت بیش‌تر نزدیک‌تر است ولی در پخشیدگی و به خصوص زمانی که معادلات انتقال و پخشیدگی در یک زمان حل می‌شوند، مشکلاتی را به وجود می‌آورد. عدم در نظر گرفتن شبکه‌های ثابت و یا مختصات ثابت در نگرش لاگرانژین باعث به وجود آمدن ناپایداری در حل عددی می‌شود، به خصوص زمانی‌که محدوده مدل‌سازی غیریکنواخت و یا ورودی و خروجی‌های مختلف و شرایط مرزی پیچیده‌ای به سامانه آب زیرزمینی حاکم باشد. از مهم‌ترین روش‌ها در نگرش لاگرانژین، می‌توان روش Random Walk Method یا روش قدم‌های تصادفی را نام برد.

۳-۲-۸- نگرش تلفیقی اولرین - لاگرانژین

با به‌کارگیری مزایای نگرش‌های اولرین و لاگرانژین و با تلفیق این دو نگرش سعی بر به وجود آوردن یک روش حل موثر و با حداقل خطای محاسباتی دارد. در روش تلفیقی اولرین – لاگرانژین، ترم انتقال معادله آلودگی با استفاده از نگرش لاگرانژین و ترم پخشیدگی معادله آلودگی از طریق نگرش اولرین حل می‌شود.

قبل از توضیح روش تلفیقی اولرین – لاگرانژین، ابتدا نگرش لاگرانژین با توضیح روش قدم‌های تصادفی ارائه می‌شود. ضمن اینکه از ذکر روش‌های اولرین (تفاضل‌های محدود و اجزا محدود) به دلیل اینکه در اکثر کتب مدل‌سازی آب زیرزمینی وجود دارد، خودداری می‌شود.

۳-۲-۹- نگرش لاگرانژین

از آن‌جا که حل عددی روش‌های اولرین دارای مشکلاتی از قبیل نوسانات و پخشیدگی عددی در حل قسمت جابه‌جایی (advection) املاح می‌باشد، روش‌های جایگزینی برای آن به‌کار برده شده است. در میان این روش‌ها، آنهایی که بر اساس دیدگاه لاگرانژین بوده‌اند، موفقیت بیش‌تری کسب کرده‌اند. روش‌های لاگرانژین، انتقال املاح را با در نظر گرفتن تعداد زیادی ذرات متحرک حل نموده و معادله جابه‌جایی – پخشیدگی را مستقیما حل نمی‌کنند. در نتیجه، روش‌های لاگرانژین دچار بخشیدگی عددی نشده و برای حل معادله جابه‌جایی املاح موثر هستند. از بین روش‌های لاگرانژین، روش قدم‌های تصادفی و بعضی از ویژگی‌های مهم روش‌های لاگرانژین در این مبحث توضیح داده می‌شود.

الف- روش گام‌های تصادفی[1]

در روش قدم‌های تصادفی، از الگوی تعقیب ذرات[2] استفاده می‌شود که در مورد پدیده جابه‌جایی و پخشیدگی با رسم شکل در صفحات آینده توضیح داده می‌شود. سپس فرض می‌شود که در اثر حرکت آب زیرزمینی، این ذره جابه‌جا می‌شود. بعد از هر جابه‌جایی عمل پخشیدگی با اضافه کردن تغییر مکان تصادفی ذره، شبیه‌سازی می‌شود. در این فرآیند، جذب سطحی با تصحیح سرعت و جرم ذرات منظور می‌شود.

۳-۲-۱۰- پدیده جابه‌جایی و پخشیدگی

مدل کلاسیک آب زیرزمینی، پدیده انتقال املاح در محیط متخلخل را بدین صورت فرض می‌کند که ابتدا یک جابه‌جایی ذرات با سرعتی برابر سرعت متوسط آب زیرزمینی و در جهت عمومی‌جریان اتفاق می‌افتد. سپس در اثر عمل پخشیدگی یک تغییر مکان تصادفی رخ می‌دهد که به جابه‌جایی اولیه اضافه می‌شود. در روش گام‌های تصادفی این دیدگاه با قراردادن تعداد زیادی ذره که به هر کدام یک جرم نسبت داده شده، دنبال می‌شود. در واقع مسیر حرکت ذره پیگیری می‌شود. به صورت زیر:

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \Delta x + z \qquad (۳-۲۵)$$

که در آن x_p^n و x_p^{n+1} موقعیت ذره را قبل و بعد از یک گام انتقال نشان می‌دهد، Δx مقدار جابه‌جایی ذره در اثر پدیده جابه‌جایی بوده و Z جابه‌جایی تصادفی ذره به واسطه پخشیدگی است.

برای تعیین جابه‌جایی تصادفی ناشی از پخشیدگی (z)، توزیع ذرات محلول را می‌توان گوسی و یا نرمال در نظر گرفت. برای نشان دادن این موضوع اگر حل تحلیلی حالت یک بعدی در نظر گرفته شود که یک جرم به صورت آنی در مقطع x=0 وارد شده و سرعت به صورت یکنواخت و برابر V باشد، در نتیجه داریم:

$$C(x,t) = \frac{C_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left[-\frac{(x-vt)^2}{4Dt}\right] \qquad (۳-۲۶)$$

که در آن $C_0 = \frac{M}{(\theta V_0)}$ غلظت اولیه است که در اثر تزریق آلاینده‌ای به جرم M به‌دست می‌آید، V_0 حجم محیط متخلخل و $D=\alpha_T$ ضریب پخشیدگی طولی می‌باشد. همان طوری‌که ملاحظه می‌شود، رابطه (۳-۲۶) مشابه رابطه تابع چگالی احتمال با توزیع نرمال متغیر تصادفی x می‌باشد، به صورت:

$$f_{(x)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \qquad (۳-۲۷)$$

که در آن μ میانگین و σ انحراف معیار می‌باشد. با مساوی قرار دادن معادلات (۳-۲۶) و (۳-۲۷) می‌توان روابط زیر را به‌دست آورد:

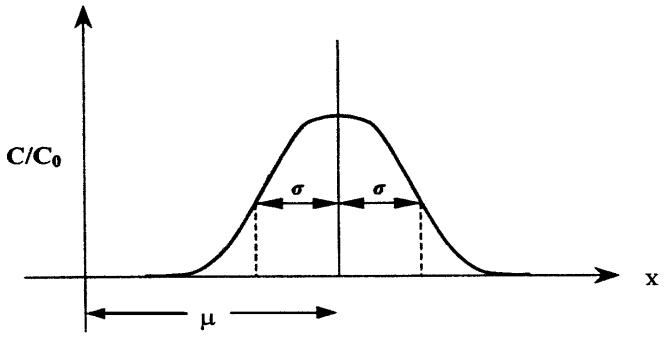
1- Random walk method, RWM
2- Particle tracking technique

$$f_x(x) = C(x,t)/C_0 \qquad (۳-۲۸)$$

$$\mu = vt$$

$$\sigma = \sqrt{2\alpha_L vt}$$

معادله (۳-۲۷) نشان می‌دهد که می‌توان جابه‌جایی ذرات را با توزیع نرمال در نظر گرفت به‌طوری‌که میانگین آن برابر جابه‌جایی املاح به واسطه سرعت متوسط جریان بوده و انحراف آن از میانگین برابر مقدار جابه‌جایی تصادفی در اثر عمل پخشیدگی می‌باشد(شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲- انتقال املاح در یک جریان یکنواخت پس از ورود لحظه‌ای آلاینده‌ای به جرم M
(توزیع پخشیدگی ذرات پس از اعمال جرم آلاینده به صورت یکنواخت و نرمال باشد)

برای یک گام زمانی، مقدار Z در معادله (۳-۲۵) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Z=N(0,\sigma^2) \qquad (۳-۲۹)$$

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \Delta x + N(0,\sigma^2) \qquad (۳-۳۰)$$

که در آن $N(0,\sigma^2)$، یک عدد تصادفی با توزیع نرمال بوده که دارای میانگین صفر و انحراف معیار $\sigma = \sqrt{2\alpha_L vt}$ می‌باشد. مقدار $N(0,\sigma^2)$ را می‌توان با تولید اعداد تصادفی، ایجاد کرد.

در حالت دو بعدی، باید جابه‌جایی تصادفی را هم به واسطه پخشیدگی طولی و هم عرضی در نظر گرفت.

می‌توان این جابه‌جایی‌های تصادفی را به صورت زیر نشان داد:

$$Z_L = N(0,\sigma_L^2)$$

$$Z_T = N(0,\sigma_T^2) \qquad (۳-۳۱)$$

که در آن Z_L و Z_T جابه‌جایی تصادفی در جهت طولی و عرضی بوده و برابر هستند با:

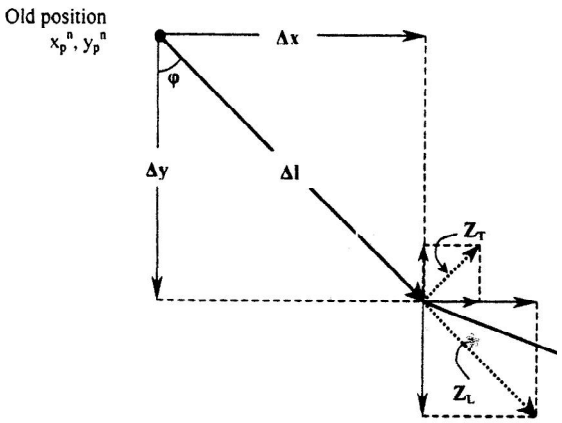
$$\sigma_L = \sqrt{2\alpha_L vt}$$

$$\sigma_T = \sqrt{2\alpha_T vt}$$

بنابراین در محاسبات مسیر ذرات در دو جهت x و y داریم:

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \Delta x + z_L \sin\varphi + z_T \cos\varphi$$
$$= x_p^n + \Delta x + z_L \frac{\Delta x}{\Delta l} + z_T \frac{\Delta y}{\Delta l} \qquad (۳۲-۳)$$
$$y_p^{n+1} = y_p^n + \Delta y + z_L \cos\varphi + z_T \sin\varphi$$
$$= y_p^n + \Delta y + z_L \frac{\Delta y}{\Delta l} + z_T \frac{\Delta y}{\Delta l}$$

که در آن $\Delta x = v_x \Delta t$، $\Delta y = v_y \Delta t$، $\Delta l = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$، φ زاویه بین جهت جابه‌جایی املاح (l) و محور y ها می‌باشد (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳- نمایش جابه‌جایی ذرات به صورت جمع‌برداری جابه‌جایی ناشی از سرعت متوسط جریان و جابه‌جایی تصادفی ناشی از پخشیدگی در جهات طولی و عرضی

معادله (۳-۳۲) یک معادله تقریبی می‌باشد. وقتی که تعداد زیادی ذره با مشخصات مشابه به طور همزمان حرکت کنند، تابع چگالی آنها (f) از معادله فوکر - پلانک[1] تبعیت می‌کند که در جریان یک بعدی به صورت شکل زیر است:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial x^2}(D_L f) - \frac{\partial}{\partial x}(vf) \qquad (۳۳-۳)$$

که در آن $D_L = \alpha_L V$ می‌باشد. از طرف دیگر، شکل استاندارد معادله پخشیدگی- جابه‌جایی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_L \frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial x}(vC) \qquad (۳۴-۳)$$

معادله (۳-۳۳) و (۳-۳۴) تا زمانی‌که D_L ثابت نباشد، مشابه نیستند. معادله (۳-۳۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_L \frac{\partial f}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(v - \frac{\partial D_L}{\partial x}\right) f\right] \qquad (۳۵-۳)$$

اگر یک عامل تصحیح به عامل سرعت اضافه شود، می‌توان نوشت:

1- Planck - Fokker

$$v \to v + \frac{\partial D_L}{\partial x} = v' \qquad (۳۶-۳)$$

سپس تابع چگالی ذرات (f) در معادله (۳-۳۳) معادله غلظت (c) در معادله (۳-۳۴) خواهد شد. به عبارت دیگر، برای حل معادله پخشیدگی- جابه‌جایی به طور صحیح با استفاده از روش قدم‌های تصادفی باید برای محاسبات سرعت حرکت ذرات از سرعت نشت به اضافه مشتق مکانی ضریب پخشیدگی استفاده کرد. اگر این مشتق کوچک باشد، می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. با این حال، خطای حاصل از حذف این عامل می‌تواند درجایی‌که ضریب پخشیدگی نسبت به مکان مقدار زیادی تغییر می‌کند (به عنوان مثال نزدیک منابع تغذیه و تخلیه) قابل ملاحظه باشد.

در محیط دو بعدی، تصحیح مورد نیاز برای عامل سرعت عبارتند از:

$$\begin{aligned} v_x' &= v_x + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} \\ v_y' &= v_y + \frac{\partial D_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} \end{aligned} \qquad (۳۷-۳)$$

عوامل تصحیح شده سرعت بجای مولفه‌های سرعت نشت برای محاسبه Δx و Δy در معادله (۳-۳۴) به‌کار می‌رود.

در روش قدم‌های تصادفی، غلظت با محاسبه جرم ذرات متحرک در یک زمان مشخص به‌دست می‌آید. معمولا غلظت‌ها بر روی سلول‌های شبکه تفاضل محدود یا گره‌های شبکه اجزا محدود که در آنها معادله جریان حل شده است، محاسبه می‌گردند. غلظت در هر سلول با استفاده از یک میانگین حسابی به‌دست می‌آید. با فرض این‌که تعداد ذرات در سلول m در زمان t برابر NP_m باشد، غلظت در هر سلول در زمان t برابر است با:

$$C_m(t) = \frac{1}{\theta v_m} \sum_{p=1}^{NP_m} M_p \qquad (۳۸-۳)$$

که در آن M_P جرم مربوط به ذره P در داخل سلول m، V_m حجم سلول m و θ تخلخل می‌باشد. اگر غلظت بر حسب کسری از جرم بیان شود، معادله (۳-۳۸) را می‌توان به صورت زیر ساده کرد:

$$C_m(t) = \sum_{p=1}^{NP_m} f_p \qquad (۳۹-۳)$$

که در آن f_p کسری از جرم است که توسط ذره P حمل می‌شود. جرم و یا کسر جرم اختصاص یافته به هر ذره بستگی به مقدار کلی جرم و تعداد کل ذرات استفاده شده در روش قدم‌های تصادفی دارد. ذرات جدید در اثر منابع ورودی املاح، بسته به حجم و غلظت جریان ورودی، به میدان اضافه می‌شود. ذراتی که در مناطق تخلیه جمع می‌شوند، از میدان خارج می‌شوند.

- مزایا و محدودیت‌های روش قدم‌های تصادفی

در روش قدم‌های تصادفی پخشیدگی‌های عددی حذف می‌شود و اعمال روش برای تهیه برنامه کامپیوتری شبیه‌سازی ساده می‌باشد. این روش قانون بقا جرم را ارضا کرده و از نظر محاسباتی دارای راندمان بالایی است به‌طوری‌که توزیع جرم را می‌توان بدون استفاده از تعداد زیادی ذرات، نمایش داد.

اولین مشکل در ارتباط با قدم‌های تصادفی طبیعت گسستگی بسیار بالای میدان غلظت می‌باشد که از جرم حمل شده توسط ذرات به‌دست می‌آید و دلیل آن این است که به‌شدت تحت تاثیر تعداد ذرات قرار دارد. تجربه و قضاوت مهندسی برای تفسیر نتایج

لازم می‌باشد. همانند سایر روش‌های لاگرانژین، روش قدم‌های تصادفی در زمانی که مولفه پخشیدگی سهم بزرگی دارد، دچار مشکل می‌شود. به‌علاوه، به دلیل آن‌که این روش کاملا به حرکت ذرات وابسته است، ممکن است در حالت شبکه‌بندی نامنظم میدان جریان و یا در مناطق نزدیک به منابع تغذیه، تخلیه دچار مشکل شود.

نگرش اولرین - لاگرانژین

در این روش، در معادله اصلی کیفیت آب‌های زیرزمینی، (۳-۱)، ترم انتقال به صورت زیر بسط داده می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(v_i C) = v_i \frac{\partial C}{\partial x_i} + C\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = v_i \frac{\partial C}{\partial x_i} + C\frac{q_s}{\theta} \qquad (۳-۴۰)$$

با جایگزینی معادله اخیر در معادله (۳-۶) و تقسیم کردن هر دو طرف معادله به فاکتور تاخیر، معادله اصلی به صورت زیر در می‌آید.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right) - \bar{v}_i\frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{q_s}{R\theta}(C - C_s) - \frac{\lambda}{R}\left(C + \frac{\rho_b}{\theta}\bar{C}\right) \qquad (۳-۴۱)$$

که در آن $\bar{v}_i = \frac{v_i}{R}$ سرعت تاخیر یافته ذره آلوده را نشان می‌دهد.

معادله (۳-۴۱)، یک معادله از نوع اولرین می‌باشد که در آن مشتق جزیی $\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)$، دامنه تغییرات غلظت (C) را در یک مکان خاص نشان می‌دهد. معادله (۳-۴۱) به فرم لاگرانژین نیز می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_i}\right) - \frac{q_s}{R\theta}(C - C_s) - \frac{\lambda}{R}\left(C + \frac{\rho_b}{\theta}\bar{C}\right) \qquad (۳-۴۲)$$

در این‌جا با جایگزینی مشتق جزیی $\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \bar{v}_i\frac{\partial C}{\partial x}$ به مشتق معمولی می‌توان مساله را حل کرد. $\frac{DC}{Dt}$، نشان‌دهنده دامنه تغییرات غلظت (C) در روی یک مسیر حرکت ذره آلوده می‌باشد. به عبارت دیگر منحنی مشخصه سرعت پیش‌روی ذره آلوده پیگیری می‌شود.

با اعمال آلگوریتم تفاضل‌های محدود با دیفرانسیل پیش‌رو، می‌توان مشتق $\frac{DC}{Dt}$ را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\Delta t} \qquad (۳-۴۳)$$

که در آن:

C_i^{n+1} مقدار متوسط غلظت مواد محلول در زمان t+1

C_i^n مقدار متوسط غلظت مواد محلول در زمان t

Δt فاصله زمانی بین t و $t+1$.

با توجه به معادله (۳-۴۳)، معادله (۳-۴۲) را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$C_i^{n+1} = C_i^n + \Delta t \times RHS(C) \qquad (۳-۴۴)$$

مقدار RHS (C) در واقع نمایانگر تقریب تفاضل محدود یا جز محدود در ترم‌های سمت راست معادله (۳-۴۲) می‌باشد.

بدیهی است که در صورتی‌که از روش صریح بخواهیم تقریب تفاضل محدود را انجام دهیم در این‌صورت مقدار غلظت در زمان t، یعنی C_i^n به‌کار برده می‌شود و در صورت استفاده از روش ضمنی، مقدار غلظت در زمان $t+1$، C_i^{n+1} خواهد بود. معادله (۳-۴۴) به عنوان الگوریتم اصلی روش اولرین- لاگرانژین در اکثر مدل‌های پیشرفته کیفیت آب‌های زیرزمینی به‌کار برده می‌شود. در این‌گونه

مدل‌ها، ترم C_i^n معادله (۳-۴۴) که برای بخش انتقال معادله به‌کار گرفته می‌شود، به روش لاگرانژین حل می‌شود در صورتی‌که ترم دوم معادله اخیر، که اثرات پخشیدگی ورودی و خروجی در نظر می‌گیرد از روش تلفیقی اولرین – لاگرانژین برآورد می‌شود. محاسبات مربوط به عکس‌العمل‌های شیمیایی ذره آلوده نیز از روش تفاضل‌های محدود با شبکه‌بندی اولرین انجام می‌شود.

بر این اساس، استفاده از روش‌های مختلف لاگرانژین برای تقریب کردن ترم انتقال به روش تلفیقی اولرین – لاگرانژین به سه صورت زیر انجام می‌شود:

- روش خطوط مشخصه[1]
- روش اصلاح شده خطوط مشخصه[2]
- روش هیبرید خطوط مشخصه[3]

در زیر به طور خلاصه هر یک از روش‌ها توضیح داده می‌شود. بدیهی است که برای اطلاع از جزییات هر روش می‌توان به کتاب‌های مختلف مراجعه کرد.

- روش خطوط مشخصه

در روش خطوط مشخصه در شروع شبیه‌سازی، فرض می‌شود که تعدادی از ذرات ماده آلوده در جریان آب زیرزمینی، به صورت تصادفی و یا با یک الگوی تعیین شده ثابت توزیع می‌شوند.

در روش خطوط مشخصه، فرض می‌شود که حرکت ذرات آلوده برروی یک مسیر مشخص از جریان صورت می‌گیرد. این فرض فقط به منظور سهولت در قانونمند کردن حرکت ذره آلوده در محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. در این روش، توزیع آلودگی در آب یا به صورت تصادفی و یا به صورت یک الگوی از پیش تعیین شده در نظر گرفته می‌شود. غلظت و موقعیت مکانی هر ذره در مختصات کارتزین x و y، مشخص می‌شود. این ذرات در جهت حرکت آب زیرزمینی به راه خود ادامه داده و در هر فاصله زمانی کوتاه، مشخصات آن تعیین می‌شود.

در پایان فاصله زمانی n، متوسط غلظت در سلول m، $C_m^{n^*}$، از روی غلظت ذره آلاینده‌ای که در داخل سلول m قرار دارد، برآورد می‌شود. فرایند این کارطبق معادله زیر توضیح داده می‌شود:

$$C_i^{n^*} = \frac{1}{NP_m} \sum_{P=1}^{NP_m} C_p^n \qquad \text{if} \quad NP_m \rangle \circ \qquad (۳-۴۵)$$

که در آن:

NP_m = تعداد ذرات در درون سلول m

C_p^n = غلظت p امین ذره در زمان گذشته n

پس از برآورد مقدار غلظت برای تمام سلول‌ها، یک غلظت وزنی

1- Method of characteristics (MOC)
2- Modified method of characteristics (MMOC)
3- Hybrid method of characteristics (HMOC)

$C_m^{n'}$ براساس $C_m^{n^*}$ و غلظت در زمان گذشته n، به ترتیب زیر محاسبه می‌شود.

$$C_m^{\hat{n}} = \omega C_m^{n^*} + (1-\omega) C_m^{n} \qquad (۴۶-۳)$$

که درآن ω فاکتور وزنی بین صفر و یک می‌باشد. مقدار $C_m^{n^*}$ برای محاسبه ترم دوم معادله (۳-۴۶) و یا تغییرات غلظت به علت پدیده پخشیدگی، ورودی- خروجی و فعل و انفعالات شیمیایی ترم سمت راست معادله (۳-۴۴) به‌کار می‌رود.

$$\Delta C_m^{n+1} = \Delta t \times RHS(C_m^{\hat{n}}) \qquad (۴۷-۳)$$

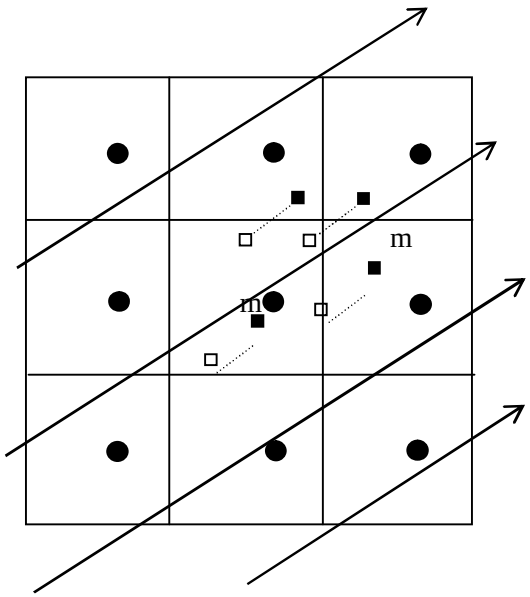
به عبارت دیگر در نظر گرفتن غلظت وزنی در معادله (۳-۳۳)، نشان‌دهنده این است که در این‌جا به دلیل فرآیندهای مختلفی مانند پخشیدگی، ورودی - خروجی آب زیرزمینی و یا فعل و انفعالات شیمیایی که در مسیر حرکت ذره آلوده ممکن است رخ دهد، به جای در نظر گرفتن غلظت، از غلظت وزنی استفاده می‌شود که طبیعتا تابعی از مقدار اثر هر یک از فرآیندهای اخیر برروی ذره آلوده می‌باشد.

غلظت در سلول m در زمان (n+۱) در واقع جمع جبری غلظت $C_m^{n^*}$ و ترم ΔC_m^{n+1} می‌باشد. غلظت همه ذرات متحرک باتوجه به تغییر پخشیدگی مرتبا اصلاح و به هنگام می‌شود. به همین ترتیب، محاسبات آلودگی در محیط متخلخل از دو روش خطوط مشخصه انجام می‌شود و این محاسبات تا آخرین زمان در نظر گرفته شده، ادامه می‌یابد. شکل (۳-۴) به طور خلاصه روند روش خطوط مشخصه را نشان می‌دهد.

یکی از معایب بزرگ روش خطوط مشخصه، باتوجه به اصول و مبنای این روش، آزادی بیش از حد در تولید محاسبات و در نتیجه ایجاد پخشیدگی عددی می‌باشد که خود، سر منشا مشکلات جدی در شمای حل روش‌های معمول عددی است. بزرگ‌ترین عیب روش MOC، کند بودن محاسبات و حجم زیاد محاسبات ذرات متحرک به خصوص در حالت سه‌بعدی (x y z) می‌باشد.

علاوه بر عیب فوق در روش خطوط مشخصه مانند سایر روش‌های اولرین- لاگرانژین، ممکن است در بعضی حالت‌ها اختلاف معنی‌داری در بیلان یک سلول ایجاد شود. دلیل اصلی این خطا می‌تواند ناشی از اصل و مبنای این‌گونه روش‌ها باشد که به طور کلی براساس قانون بقای جرم بنا نهاده شده‌اند.

نخستین گام در روش خطوط مشخصه، قراردادن تعدادی ذره مشخصه (نشانه‌دار) با پراکندگی یکنواخت در داخل شبکه‌های مدل می‌باشد. تجربه نشان داده است که برای حل معادله انتقال در سامانه دوبعدی، انتخاب ۴ تا ۹ ذره نشانه نتیجه خوبی داده است. موقعیت هر ذره شبکه به وسیله مختصات x و y آن، غلظت کیفیت شیمیایی ذره، معادل غلظت آب مرکز شبکه‌ای که در آن قراردارد، تعیین می‌شود. مسافتی که هر ذره در هر گام زمانی می‌پیماید، متناسب با سرعت آن و مدت گام زمانی می‌باشد. (شکل ۳-۴)



موقعیت ذره در ابتدای گام زمانی

موقعیت جدید ذره

جهت جریان آب زیرزمینی

..... مسیر حرکت ذره

شکل ۳-٤- حرکت جریان آب و ذره در روش خطوط مشخصه

روش اصلاح شده خطوط مشخصه

همان‌گونه که قبلا ذکر گردید، اشکال بزرگ روش خطوط مشخصه، حجم عملیات بود، به همین منظور این روش اصلاح شد. به این ترتیب که در این روش به‌جای این‌که تعداد زیادی ذرات متحرک با غلظت و مختصات معین در داخل سلول در نظر گرفته شود، ذرات نشانه‌دار فقط در روی گره‌های شبکه‌ها (سلول‌ها) در نظر گرفته می‌شود و محاسبات برای گام زمانی (n+1) فقط در روی این نقاط انجام می‌شود. در اینجا، ذره به سمت عقب برگشته تا موقعیت خود را در زمان n پیدا کند. در این‌حالت غلظت با آن موقعیت به عنوان تقریبی از غلظت $C_m^{n^*}$ در نظر گرفته می‌شود. به این صورت:

$$C_{mn}^{n^*} = C^n(x_p) = C^n(x_m - d) \qquad (۴۸-۳)$$

که در آن:

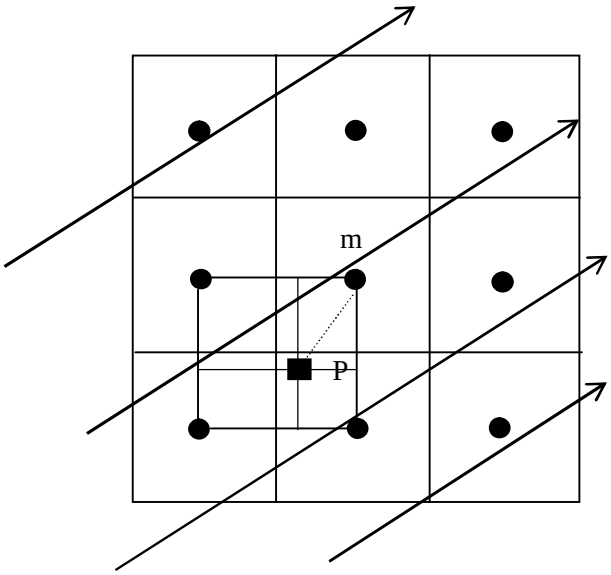
x_p = موقعیت برگشتی ذره که در زمان Δt از گره m به عقب برگشته است.

x_m = موقعیت گره m

d = فاصله جابه‌جایی ذره مشخصه یا فاصله بین مسیر ذره از x_m تا x_p

$C_m^{n^*}$ = غلظت در نقطه x_p در زمان n (معمولا این غلظت باتوجه به نقاط مجاور خود میان‌یابی می‌شود)

شمای روش اصلاح شده خطوط مشخصه در شکل (۳-۵) ارائه می‌شود.



● موقعیت جدید ذره پس از برگشت از نقطه m در زمان Δt

■ موقعیت ذره در ابتدا (در روی گره m)

➔ جهت جریان آب زیرزمینی

..... مسیر حرکت ذره

شکل ۳-۵- حرکت جریان آب و ذره در روش اصلاح شده خطوط مشخصه

روش خطوط مشخصه اصلاح‌شده، فقط از یک ذره برای هر شبکه (سلول) تفاضل‌های محدود استفاده می‌کند در حالی‌که در روش خطوط مشخصه تعداد زیادی ذره در هر شبکه مورد استفاده قرار می‌گرفت. باتوجه به این مزیت مهم، روش خطوط مشخصه اصلاح شده حتی در حالت‌هایی که محدوده مدل‌سازی بزرگ است و یا حالت سه‌بعدی، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

روش هیبرید خطوط مشخصه

همان طوری‌که ملاحظه گردید، روش‌های خطوط مشخصه و خطوط مشخصه اصلاح‌شده از طریق معادله اولرین- لاگرانژین حل می‌شوند. انتخاب هریک از روش‌های فوق تابعی از سریع یا آهسته بودن جبهه تاثیر غلظت آلاینده و همچنین حافظه کامپیوتر می‌باشد. علاوه بر دو روش مذکور، روش هیبرید نیز وجود دارد که در واقع تلفیقی از دو روش خطوط مشخصه و خطوط مشخصه اصلاح شده می‌باشد. در این روش سعی شده است که از نقاط قوت هر یک از روش‌ها استفاده کرده و با یک شمای تطبیقی خودکار براساس این‌که به طور مثال، جبهه آلایندگی سریع است، روش خطوط مشخصه را انتخاب کند و مساله را حل کند. به عبارت دیگر، اگر جبهه آلایندگی سریع باشد، روش خطوط مشخصه انتخاب شده و ذرات متحرک به طور خودکار در اطراف هر جبهه توزیع می‌شوند. در حالی‌که جبهه آلایندگی آهسته باشد، بلافاصله روش خطوط مشخصه اصلاح‌شده انتخاب شده و ذرات نشانه‌دار در نقاط گره‌ها به طور خودکار، به زمان n برگشت داده می‌شوند. در فرآیند حل در روش هیبرید به محض این‌که جبهه پخشیدگی و عکس‌العمل شیمیایی ناپدید شود، عملیات پیش‌روی قطع می‌شوند. به منظور داشتن معیارهایی جهت انتخاب بین دو روش خطوط مشخصه و خطوط مشخصه اصلاح‌شده دامنه‌ای برای عدد پکلت از صفر تا بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود.

آن‌چه که در انتهای این مبحث قابل ذکر است، این است که به علت پیچیدگی مدل‌سازی آلودگی آب‌های زیرزمینی، گرچه روش‌های مذکور توصیه می‌شوند ولی تحقیقات در زمینه تئوری مساله همچنان در مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی دنیا ادامه دارد.

۳-۳- انتخاب مدل عددی و نرم افزار مناسب برای آبخوان

با توجه به نیاز حل معادلات جریان و آلودگی در آب‌های زیرزمینی از حدود ۳۰ سال پیش در اکثر مراکز تحقیقاتی، دانشگاهی و مهندسین مشاور دنیا، مدل‌سازی عددی آغاز شد. به خصوص با پیشرفت کامپیوتر از نظر حافظه و سرعت، امکان استفاده از روش‌های مختلف عددی فراهم شد. در این میان انجمن ژئوفیزیک آمریکا[1]، مرکز بین‌المللی مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی[2] در ایالت کلرادو امریکا، سازمان تحقیقات زمین‌شناسی امریکا[3]، مراکز تحقیقاتی در فرانسه، آلمان، انگلیس و استرالیا بیش‌ترین فعالیت را نسبت به سایر کشورهای دنیا در این زمینه داشته‌اند. از طرف دیگر با این‌که روند مدل‌سازی عددی مرتبا ادامه داشته و دارد، گاه بنا به ضرورت مساله، مدل‌های تحلیلی نیز در مواقع خاص تهیه می‌شوند.

در میان انواع مختلف مدل‌ها، مدل‌هایی که در گروه مدل‌های پیش‌بینی قرار دارند، همواره بیش‌ترین توجه بخش‌های اجرایی را متوجه خود ساخته‌اند. چه، این مدل‌ها قادر باشند که علاوه بر شبیه‌سازی سامانه آبخوان و شناسایی خوب آبخوان، عکس‌العمل آبخوان را در برابر تنش‌های مختلف از قبیل پمپاژ، تغذیه و آلودگی ارائه کنند یا نه.

در اکثر موارد، مدل‌های پیش‌بینی به صورت قطعی (یک عدد) و در موارد بسیار اندک، به صورت احتمالاتی (چند عدد) سطح آب در آبخوان را پیش‌بینی می‌کنند. با توجه به غیرهمگنی آبخوان در طبیعت، در مدل‌های پیش‌بینی آب‌های زیرزمینی پارامترهای آبخوان به صورت توزیعی در محدوده مورد مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در اکثر مدل‌ها، جریان آب در محیط متخلخل توسط قانون دارسی مورد بررسی قرار می‌گیرند. به جز در حالات خاص مانند سازندهای درز و شکاف‌دار و کارستیک، نحوه برخورد با طبیعت، بسته به ماهیت مساله ممکن است از نظر مکانی یک، دو و یا سه‌بعدی در نظر گرفته شوند. مدل‌های آب‌های زیرزمینی ممکن است، برای محیط‌های غیراشباع، اشباع و حالات یک فازی (یک نوع سیال) چند فازی (آب+هوا،آب شور و شیرین) و برای آبخوان‌های تحت فشار یا آزاد تهیه شوند. در هر حالت اکثریت مدل‌های تهیه شده در آب‌های زیرزمینی قادر هستند که در محیط غیرهمگن و غیریکنواخت کاربرد داشته باشند. این مدل‌ها از نظر زمانی نیز می‌تواند در دو حالت ماندگار و غیرماندگار آبخوان عمل کنند.

همان طوری‌که قبلا ذکر گردید، مدل‌های عددی در آب‌های زیرزمینی، معادلات دیفرانسیل جزیی پدید آمده در آلودگی محیط متخلخل را از طریق روش‌های مختلف حل می‌کنند. معمولا روش‌هایی مانند تفاضل‌های محدود اجزا محدود در مدل‌های کمی‌آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود و خطوط مشخصه و قدم‌های تصادفی در مدل‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. ضمن این‌که ممکن است روش اجزا محدود نیز در مدل‌سازی کیفی مورد استفاده قرار گیرد.

1- American geophysical union "AGU"
2- IGWMC
3- USGS

با توجه به کثرت مدل‌های موجود در کیفیت آب‌های زیرزمینی، به منظور این‌که بتوان مدلی را جهت آبخوان خاصی انتخاب و از آن استفاده کرد، معیارهای زیر باید در نظر گرفته می‌شود.

۳-۳-۱- معیارهای انتخاب مدل مناسب

بدون شک یکی از مهم‌ترین معیارهای انتخاب مدل، کارایی مدل است که با در نظر گرفتن خصوصیات هیدروژئولوژیکی و کیفی آبخوان بتواند در شرایط طبیعی مورد استفاده قرار گیرد. در بحث آلودگی و کیفیت آب‌های زیرزمینی، مدل‌های بسیاری وجود دارند که در زمینه‌های مختلف مانند شوری، آلودگی‌های ناشی از کشاورزی مانند نیترات، پتاسیم و آلودگی‌های نفتی، آلودگی‌های فاضلاب شهری و صنعتی و همچنین اتمی، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. بدیهی است باتوجه به نوع مشکل، مدلی که بتواند پاسخ‌گوی مساله باشد و کارایی لازم را داشته باشد باید انتخاب شود.

از طرف دیگر با توجه به نیاز مدل کیفی به پارامتر سرعت آب و مقادیر بیلان در هر گره، این مدل باید قابلیت تلفیق با مدل کمی‌را داشته باشد.

معیار دیگر را می‌توان عمومیت مدل دانست، طوری که مدل فقط خاص یک مساله و در یک منطقه نباشد بلکه بتواند در شرایط مختلف با اندک اصلاحاتی جوابگو باشد. در غیر این صورت فقط مختص یک منطقه خواهد بود و از آن نمی‌توان در سایر نقاط استفاده کرد.

این معیار را می‌توان براساس تعداد کاربرها، آزمون‌ها و حالات واقعی که مدل در آن مورد استفاده واقع شده است سنجید. در نتیجه موفقیت مدل، صحت‌سنجی و تایید مدل نیز در این معیار، مورد نظر قرار می‌گیرد. معمولا در صورتی‌که مدل عمومیت داشته باشد، کتابچه راهنمای مدل، رفرنس‌ها و سایر موارد پشتیبانی مدل در دسترسی عموم قرار خواهد گرفت تا کاربر را هرچه سریع‌تر در راه‌اندازی و تنظیم مدل هدایت کند. در مقابل، ممکن است مدل‌هایی به سفارش خاص توسط مراکز تحقیقاتی و یا مهندسین مشاور در مدت زیادی (مثلا ۵ یا ۱۰ سال و بیش‌تر) تهیه شوند که جنبه خصوصی داشته و در دسترس عموم قرار نمی‌گیرد.

علاوه بر موارد فوق، معیار سهولت کاربرد مدل یا یکی از معیارهای مهم در انتخاب نرم افزار مناسب می‌باشد. بدیهی است که مدلی که بتواند با دقت قابل قبول، در مراحل مختلف مدل‌سازی اعم از ورود داده‌ها، خروج داده‌ها و تنظیم و ارائه نتایج، پیچیده و مشکل نباشد، ترجیحا پیشنهاد می‌شود. ضمن این‌که قابلیت‌های تلفیق با سامانه اطلاعات جغرافیایی[1] و ارائه نتایج به صورت گرافیکی از مواردی است که می‌تواند علاوه بر موارد فوق در انتخاب مدل مناسب موثر باشد.

به منظور انتخاب مدل مناسب آبخوان، در زیر بعضی از مدل‌ها و خصوصیات آنها به اختصار توضیح داده می‌شود:

- مدل PETRASIM

- تهیه‌کننده: شرکت خصوصی – فوریه ۲۰۰۳
- دو بعدی و سه‌بعدی – جریان و آلودگی و حرارت
- چند فازه، آب– گاز و NAPL

1- GIS: Geographic information system

- روش تفاضل‌های محدود خطوط مشخصه
- در دسترس عموم

– مدل HYDROTHERM

- تهیه‌کننده: سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا (USGS) ۱۹۹۶
- سه‌بعدی – شبیه‌سازی جریان و حرارت
- روش تفاضل‌های محدود – زبان فرترن 77
- کاربرد در آبخوان‌های گرم
- در دسترس عموم

– مدل SEAWAT

- تهیه‌کننده: سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، ۲۰۰۰
- کاربرد برای تداخل آب شور و شیرین
- تلفیق MT3DMS+Mudflow
- در جریان، روش تفاضل‌های محدود – در آلودگی یکی از روش‌های مدل MT3D، زبان فرترن 77
- در دسترس عموم

– MF2K - GWT

- تهیه‌کننده: شرکت خصوصی
- تلفیقی از دو مدل Ground Water Transport و Modflow-2000(MF2K)
- دو و سه‌بعدی جریان و آلودگی
- جریان روش تفاضل محدود– آلودگی از MOC3– زبان فرترن 77
- در دسترس عموم

– FRACMAN

- تهیه‌کننده: شرکت خصوصی در سال ۲۰۰۲
- جریان و حمل مواد در محیط‌های درزو شکاف‌دار
- دو و سه‌بعدی
- در دسترس عموم – قابلیت بالای گرافیکی

– SHARP

- تهیه‌کننده: سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا (USGS) ۱۹۹۶

- جریان و آلودگی
- دو بعدی، روش تفاضل‌های محدود- زبان فرترن 77
- کاربرد در آبخوان‌های ساحلی در بررسی تداخل آب شور و شیرین
- در دسترس عموم

- مدل AQUA

- تهیه‌کننده مهندسین مشاور در کشور ایسلند – سال ۱۹۸۱
- دو بعدی و سه‌بعدی – جریان و آلودگی
- روش اجزا محدود – زبان فرترن 77
- کاربرد به خصوص در کشورهای اروپائی و در آبخوان‌های آبگرم
- در دسترس عموم

- مدل ASM

- تهیه‌کننده: دانشگاه کاسل آلمان – ۱۹۸۶
- دو بعدی – جریان و آلودگی
- روش تفاضل‌های محدود – زبان Qbasic
- بیش‌تر در جنبه آموزشی کاربرد دارد و نه حرفه‌ای.
- در دسترس عموم

- مدل CFEST

- تهیه‌کننده: مرکز تحقیقات دفع زباله‌های اتمیو آزمایشگاه۱، آمریکا –۱۹۸۷
- سه‌بعدی – جریان و آلودگی‌های فاضلاب
- روش اجزا محدود – زبان فرترن IV
- کاربرد در چند مورد خاص در امریکا
- حالت خصوصی داشته و در دسترس عموم قرار ندارد.

- مدل FEMWATER و LEWASTE

- تهیه‌کننده: آزمایشگاه Oak Ridge National Laboratory – ۱۹۸۷ و ۱۹۸۹
- دو بعدی و سه‌بعدی – محیط اشباع – غیراشباع – جریان و آلودگی

1- Pacific northwest laboratory

- روش اجزا محدود – زبان فرترن IV
- کاربرد در تحقیقات اثرات فاضلاب‌ها برروی آبخوان – در اروپا و آمریکا کاربرد زیاد
- در دسترس عموم

– مدل FTRANS

- تهیه‌کننده: شرکت مهندسین مشاور Geotrans آمریکا – ۱۹۸۳
- دوبعدی – جریان و آلودگی‌های اتمی– محیط درز و شکاف‌دار– یک لایه و چند لایه
- روش اجزا محدود – زبان فرترن IV
- کاربرد جنبه خاص.
- حالت خصوصی داشته و در دسترس عموم قرار ندارد.

– مدل HST3D

- تهیه‌کننده: سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا (USGS) – ۲۰۰۱
- سه‌بعدی – جریان و آلودگی
- جریان روش تفاضل‌های محدود ضمنی– آلودگی روش خطوط مشخصه– زبان فرترن 77
- کاربرد در حالات مختلف از قبیل فاضلاب – رادیو اکتیو– تداخل آب شور و شیرین و آبخوان‌های آب گرم
- در دسترس عموم

– مدل MOC MOCDENSE

- تهیه‌کننده: سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا (USGS) ۱۹۷۸، ۱۹۸۹، ۱۹۹۹.
- دوبعدی و سه‌بعدی – جریان و آلودگی
- روش (خطوط مشخصه) – زبان فرترن IV
- کاربرد در حالات مختلف آلودگی به خصوص پیگیری آلاینده‌های نقطه‌ای.
- در دسترس عموم

– مدل MT3D

- تهیه‌کننده: شرکت مهندسین مشاور پاپادوپولوس و شرکاء۱ – آمریکا ۱۹۸۹، ۹۹۹، ۲۰۰۰.
- دوبعدی و سه‌بعدی – جریان و آلودگی – امکان تلفیق با Mudflow حل معادلات جریان توسط روش تفاضل‌های محدود
- معادلات آلودگی روش‌های خطوط مشخصه MOC و فرم اصلاح شده آن (MMOC)
- کاربرد وسیع در حل مسایل آلودگی آبخوان در اکثر کشورهای دنیا، به خصوص در سال‌های اخیر

1- Papadopoulos and associates

- در دسترس عموم (ابتدا در دسترس عموم قرار نداشت ولی بعد از اینکه سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا امتیاز این مدل را به‌دست آورد، مدل، عمومیت یافت.)

- مدل NAMMU

- مرکز تحقیقاتی AERE انگلستان – ۱۹۸۴
- یک، دو و سه‌بعدی – جریان و آلودگی
- روش اجزا محدود – زبان، فرترن 77
- کاربرد در شرایط خاص و آلودگی ناشی از رادیو اکتیو
- خصوصی بوده و در دسترس عموم قرار ندارد.

- مدل SUTRA

- تهیه‌کننده: سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا (USGS) ۱۹۸۴، ۱۹۹۹،۲۰۰۱
- دو بعدی – جریان و آلودگی
- روش اجزا محدود – زبان، فرترن 77
- کاربرد وسیع در تداخل آب شور و شیرین و در محیط‌های اشباع و غیراشباع
- در دسترس عموم

- مدل SWIFT

- تهیه‌کننده: Sandia National Laboratories آمریکا – ۱۹۹۱
- یک، دو و سه‌بعدی – جریان و آلودگی
- روش تفاضل‌های محدود – زبان، فرترن IV
- کارآیی در سازندهای آبرفتی و درز و شکاف‌دار – کاربرد به خصوص در مراکز تحقیقاتی اروپا و آمریکا
- در دسترس عموم

- مدل VERA

- تهیه‌کننده: آزمایشگاه مکانیک خاک دلفت هلند – ۱۹۸۲
- سه‌بعدی – جریان و آلودگی
- روش تفاضل‌های محدود برای جریان و روش خطوط مشخصه درآلودگی– زبان، فرترن IV
- کاربرد در مسایل خاص آلودگی به خصوص رادیو اکتیو
- خصوصی بوده و در دسترس عموم قرار ندارد

- مدل RANDOM WALK

- تهیه‌کننده: مرکز تحقیقات دانشگاه ایالتی ایلی نویز آمریکا، ۱۹۸۱ و ۱۹۹۹
- یک و دو بعدی – جریان و آلودگی
- روش تفاضل‌های محدود برای جریان در آلودگی روش قدم‌های تصادفی– زبان، فرترن IV
- کاربرد وسیع در آمریکا به خصوص در آلودگی ناشی از فاضلاب
- در دسترس عموم.

علاوه بر مدل‌های فوق‌الذکر، مدل‌های خاصی در زمینه‌های آلودگی نفتی و شیمیایی مانند NAPL و CHEMTRANS و ... و همچنین مدل‌های آنالیتیکی مانند PATHS و STANMOP(2003) نیز تهیه شده‌اند که بسته به اهداف مدل‌سازی می‌توانند، مورد استفاده قرار گیرند.

از سال ۱۹۹۵ میلادی (۱۳۷۴ شمسی)، به خصوص با به بازار عرضه شدن نسخه‌های جدید سامانه عامل Windows، مانند Win 95 و Win 98 و Win 2000 و Win XP، بعضی از شرکت‌های خصوصی در آمریکا با تطبیق مدل‌های موجود آب‌های زیرزمینی با این سامانه عامل و بالا بردن جنبه‌های گرافیکی آنها و ارائه خدمات بعد از فروش به طور وسیعی نرم‌افزارهای مختلفی در زمینه مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی به دنیا ارائه کردند.

به طور مثال می‌توان PMWIN، GMS، MT3D، Aqua3D، Aqua chem، MT3D99، FEFlow، Aquasea، Two dan، Win Flow، Win Tran، HST3D، SUTRA و Modflow/Moc3D و... را نام برد. در میان مدل‌های مختلف نامبرده در بالا، بدون شک مدل‌هایی که بیش‌ترین کاربرد را در کیفیت آب‌های زیرزمینی در کشورهای مختلف دنیا اعم از مراکز اجرایی، تحقیقاتی، دانشگاهی و مهندسین مشاور داشته است، مدل‌های MT3D و SUTRA می‌باشد. مدلMT3D که نتیجه سال‌ها تحقیقات در یکی از شرکت‌های مهندسین مشاور در آمریکا می‌باشد، پس از کارایی بالایی که از خود نشان داد مورد توجه سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا قرار گرفت و از آن به بعد توسط این سازمان گسترش و تصحیح شد. مدل SUTRA یک مدل کمی و کیفی است و قابلیت شبیه‌سازی در دو محیط غیراشباع و اشباع را دارد. این مدل توسط سازمان تحقیقات زمین‌شناسی امریکا تهیه شده است. با توجه به قابلیت بالا و داشتن زیر برنامه‌های مختلف که دربرگیرنده حالت‌های گوناگون تشکیل‌دهنده یک سامانه آب‌های زیرزمینی می‌باشد، این دو مدل مدل‌های تقریبا کاملی از نظر مدل‌سازی کیفی یک سامانه در محیط اشباع و تشکیلات آبرفتی می‌باشند.

نسخه‌های جدید مدل روش خطوط مشخصه و خطوط مشخصه اصلاح شده، از سال ۲۰۰۰ به بعد توسط سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا به بازار عرضه شده است. این مدل در مواردی که تزریق نقطه‌ای ماده آلوده‌ای به آبخوان اعمال می‌شود کاربرد دارد.

آن‌چه که در مرحله انتخاب مدل باید دقت کرد، این است که مدل بتواند مساله خاص منطقه را از نظر آلودگی آب‌های زیرزمینی حل کند، درغیر این‌صورت نتایج مدل‌سازی نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. به همین جهت مدت زمانی برای انتخاب نوع مدل مناسب منطقه لازم است. بدیهی است که هیچ مدلی نمی‌تواند از قبل برای یک منطقه دیکته شود، چراکه در این صورت بدون توجه به ماهیت کیفی آبخوان، مدل آن از قبل تعیین شده است و بدیهی است که در چنین مواردی اهداف مدل‌سازی تامین نخواهد شد. به

همین جهت، با این‌که سه مدل فوق‌الذکر از نظر کاربرد، معروف‌تر از سایر مدل‌ها می‌باشد. ولی صرفا جهت آگاهی و اطلاع‌رسانی در این نوشتار ارائه گردیده‌اند و به هیچ وجه نمی‌توان آنها را از قبل از انجام تهیه مدل برای منطقه‌ای، توصیه کرد.

۳-٤- شبکه‌بندی، شرایط مرزی، شرایط اولیه، عوامل تغذیه و تخلیه و پارامترهای مدل

یکی از مراحل مهم در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، راه‌اندازی مدل با استفاده از داده‌ها و اطلاعات موجود آبخوان می‌باشد. به طور کلی به دلیل پیچیدگی در ساختار زمین‌شناسی و وسعت آبخوان، معمولا آمار و اطلاعات کافی وجود ندارد. هزینه‌های گزاف ایجاد شبکه متراکم چاه‌های مشاهده‌ای، اکتشافی و انجام آزمایش پمپاژ و تجزیه شیمیایی آب آبخوان (به خصوص در موارد خاص مانند آنالیز شیمیایی از نظر فلزات سنگین، پاک‌کننده‌ها و...)، بودجه ناکافی و عدم تطبیق سامانه اداری با امور تحقیقات، باعث شده است که در اکثر آبخوان‌های ایران، در مرحله راه‌اندازی مدل با کمبود آمار مواجه شویم. بدیهی است که هر چقدر آمار و اطلاعات بیش‌تری از آبخوان موجود باشد، مدل تهیه شده از دقت بیش‌تری برخوردار خواهد بود.

در ادامه فرآیند تهیه مدل ریاضی کیفی آبخوان (پس از انتخاب نرم‌افزار مناسب)، ابتدا باید منطقه مطالعاتی به شبکه‌های کوچک تقسیم و سپس باتوجه به مدل مفهومی شرایط مرزی تعیین شوند. از طرف دیگر با انتخاب گام زمانی مناسب، شرایط اولیه نیز در مدل‌سازی در رژیم غیرماندگار باید تعیین شود. مرحله بعدی تعیین و اعمال پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل می‌باشد. می‌توان به طور خلاصه مراحل فوق را به ترتیب زیر و به صورت فهرست‌وار ارائه کرد:

- شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه
- تعیین شرایط مرزی
- تعیین شرایط اولیه و انتخاب گام‌های زمانی
- عوامل تغذیه و تخلیه (طبیعی و مصنوعی)
- پارامترهای ورودی
- پارامترهای مدل
- پارامترهای جریان
- ضریب هدایت هیدرولیکی (K)
- آبدهی ویژه
- پارامترهای کیفی
- غلظت آب آبخوان
- غلظت آلاینده ورودی
- ضرایب پخشیدگی طولی و عرضی
- تخلخل

بدیهی است که با توجه به این‌که پیش‌نیاز مدل کیفی، مدل کمی می‌باشد. بنابراین فرض می‌شود که در فرایند تهیه مدل کمی داده‌هایی چون ضرایب هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال آبخوان، ضخامت آبخوان، سطح آب، ضریب ذخیره (در آبخوان تحت فشار)، آبدهی ویژه (در آبخوان آزاد) و... از قبل تعیین و به مدل کمی‌داده شود.

۳-٤-۱- شبکه‌بندی آبخوان

برای این‌که بتوان معادلات دیفرانسیل جزیی در آلودگی آب‌های زیرزمینی را از طریق عددی حل کرد، باید منطقه مطالعاتی را به یک‌سری قطعات و شبکه‌های کوچک تقسیم کرد. به عبارت دیگر محورهای x و y و z به فواصل کوچک‌تر Δx و Δy و Δz قسمت می‌شوند. از طرف دیگر در تهیه مدل ریاضی آبخوان در رژیم غیرماندگار باتوجه به تغییرات متغیر وابسته (مانند غلظت و یا سطح آب)، نسبت به متغیر زمان، باید دوره تنش (T) به یک‌سری گام‌های زمانی (Δt) تقسیم شود. با توجه به اهمیت این تقسیم‌بندی (چه مکانی و چه زمانی)، لذا در این بخش نکات اساسی این کار توضیح داده می‌شود.

۳-٤-۲- شبکه‌بندی مکانی یا تقسیم‌بندی مکانی[1]

به دلیل این‌که در مقیاس دو بعدی، شبکه‌بندی افقی و در مقیاس سه‌بعدی شبکه‌بندی افقی و عمودی لازم است، لذا ابتدا شبکه‌بندی افقی مورد بحث قرار می‌گیرد.

- **شبکه‌بندی افقی**

به منظور این‌که بتوان معادلات پایه آلودگی آب‌های زیرزمینی را در یک منطقه وسیع و با روش عددی حل کرد، باید منطقه را به شبکه‌های ریزتری تقسیم کرد تا بتوان گام به گام معادلات را از نقطه شروع که همان شرایط مرزی است دنبال نموده و حل کرد. در روش تفاضل‌های محدود معمولا منطقه مطالعاتی با استفاده از دو دسته خطوط موازی عمود برهم به تعدادی شبکه مستطیلی و یا مربعی تقسیم می‌شوند. در روش اجزا محدود، احجام محدود منطقه به تعدادی بخش چندضلعی (معمولا مثلثی) تقسیم می‌شود.

در اکثر پروژه‌های مدل‌سازی، مقیاس مساله مورد بررسی و محدودیت ذخیره کامپیوتر (مورد اخیر در حال حاضر کم‌تر وجود دارد)، مواردی هستند که اندازه و ابعاد شبکه را دیکته می‌کنند. به طور مثال در منطقه‌ای کارخانه‌های پساب صنعتی خود را از طریق یک چاه تزریقی به آبخوان هدایت می‌کند. در صورتی‌که فاصله این کارخانه تا رودخانه ۲۰۰ متر باشد و بخواهیم روند حرکت این آلاینده را از طریق آبخوان به داخل رودخانه پیگیری کنیم، ابعاد شبکه مدل باید در این منطقه خاص کم‌تر از ۲۰۰ متر باشد و حالت عکس این است که در صورتی‌که حرکت یک ماده آلاینده‌ای را بخواهیم در کیلومترها دورتر از نقطه شروع آن کنترل کنیم. در این‌صورت بهتر است ابعاد شبکه بزرگ‌تر انتخاب شوند.

به طور کلی هر قدر ابعاد شبکه‌ها کوچک‌تر باشند، تعداد شبکه‌ها زیادتر شده و دقت محاسبات افزایش می‌یابد. ضمن این‌که با افزایش تعداد شبکه‌ها داده‌های ورودی بیش‌تری مورد نیاز خواهد بود و حجم عملیات محاسباتی و همچنین حجم پردازش داده‌های ورودی زیادتر خواهد شد.

1- Spatial discretization

در جهت افقی شبکه‌ها ممکن است یکنواخت و یا متغیر باشد. به این صورت که معمولا در محدوده داخلی منطقه، شبکه‌ها منظم طراحی می‌شوند و در نزدیک مرزهای هیدرولوژیکی به دلیل پوشش دادن کامل منطقه در مدل، ممکن است شبکه‌ها متغیر انتخاب شوند.

طراحی و اجرای شبکه‌های یکنواخت در شبیه‌سازی جریان و آلودگی آب‌های زیر زیرزمینی خطاهای موجود به شرح زیر می‌باشد:

- خطاهای قطع محاسبات در حل عددی معادلات جریان و حمل مواد معمولا در شبکه‌های یکنواخت و منظم کم‌تر از شبکه‌های متغیر می‌باشد.
- در ورود پارامترهای مدل معمولا برای برآورد پارامترها با استفاده از مقادیر مشاهده شده، از روش میان‌یابی استفاده می‌کنند. اکثر نرم‌افزارهای میان‌یابی، برای شبکه‌های یکنواخت تهیه شده‌اند و قادر به میان‌یابی در شبکه‌های نامنظم نیستند.
- مقادیر محاسبه شده سطح آب و غلظت مواد محلول در شبکه‌های منظم یک مدل می‌تواند به طور مستقیم به عنوان داده در نرم‌افزارهای گرافیکی و GIS (سامانه اطلاعات جغرافیایی)، انتقال داده شود بدون این‌که نیاز به یک فرایند میان‌یابی مجدد داشته باشد. چه در این‌صورت ممکن است خطای ناشی از میان‌یابی برروی نتایج و همچنین نقشه حاصل تاثیر منفی بگذارد.

با توجه به دلایل مذکور، بهتر است شبکه‌ها یکنواخت در نظر گرفته شود. ضمن این‌که، در حالت خاص و در صورت نیاز می‌توان در نزدیک مرزها و نقاط بحرانی، شبکه‌ها را غیریکنواخت و نامنظم طراحی کرد. در این حالت اگر از روش تفاضل‌های محدود استفاده شود، بهتر است که ابعاد شبکه براساس ضریب‌هایی مانند ۱/۵ یا ۲ نسبت به شبکه قبلی بزرگ‌تر یا کوچک‌تر شوند.

علاوه بر مسایل فوق و این مورد که بهتر است شبکه‌ها یکنواخت طراحی شوند، در شبیه‌سازی حمل مواد محلول در صورتی‌که بخواهیم از روش‌های کلاسیک تفاضل‌های محدود و اجزا محدود استفاده کنیم، یک معیار دیگری به منظور حداقل کردن پخشیدگی عددی در فرآیند حل معادلات دیفرانسیل جزیی حمل مواد، در نظر گرفته می‌شود. این معیار اندازه شبکه را براساس عدد پکلت به صورت زیر تعیین می‌کند:

$$P_e = \frac{\upsilon_x \Delta x}{D_{xx}} \qquad (۳-۴۹)$$

که در آن:

Pe : مقدار عدد پکلت در محور x

υx : سرعت آب در آبخوان

Δx : اندازه شبکه در محور x

Dxx، ضریب پخشیدگی مواد محلول در آبخوان و در جهت محور x می‌باشد (فرمول اخیر در مورد جهات y، z عینا قابل استفاده است).

همان طوری‌که رابطه (۳-۴۹) نشان می‌دهد، هرچقدر مقدار ابعاد شبکه بزرگ‌تر باشد، مقدار عدد پکلت هم زیاد خواهد شد و در نتیجه پخشیدگی عددی افزایش می‌یابد. به همین دلیل توصیه می‌شود برای کاهش خطای پخشیدگی عددی، مقدار شبکه (Δx)

کوچک‌تر انتخاب شود. معمولا با مقدار Pe≤2، خطای محاسباتی طوری کاهش می‌یابد که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در بعضی مدل‌ها مانند SUTRA، عدد پکلت کم‌تر از ۴ توصیه شده است.

از طرف دیگر تعیین اندازه شبکه صرفا با استفاده از معیار عدد پکلت، در مسایل کاربردی توام با خطا می‌باشد. به دلیل این‌که اکثرا برآورد ضرایب پخشیدگی به‌سادگی امکان‌پذیر نیست و در نتیجه نمی‌توان مخرج کسر رابطه (۳-۴۹) یعنی Dxx را به‌درستی و دقیق تعیین کرد.

- شبکه‌بندی عمودی

علاوه بر شبکه‌بندی افقی، درصورتی‌که مدل‌سازی را در سه‌بعد x، y و z بخواهیم انجام دهیم، شبکه‌بندی عمودی نیز مورد نیاز خواهد بود که اساس این شبکه‌بندی، همگنی و غیرهمگنی آبخوان می‌باشد. از نظر تئوری می‌توان شبکه‌بندی عمودی را به صورت یکنواخت انجام داد و یا در صورتی‌که از نظر قابلیت هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلفی را تشکیل بدهند، در هر لایه شبکه‌بندی به‌طور یکنواخت انجام شود. به طور کلی تقسیم عمودی آبخوان به شبکه‌های کوچک، تقسیماتی هستند که باعث می‌شود، داده‌های لازم مانند ضرایب هیدرودینامیک و پارامترهای حمل مواد و بیلان ورودی و خروجی هر شبکه، مورد نیاز باشد که در عمل کار بسیار مشکلی خواهد بود و تقریبا غیرعملی می‌باشد.

از طرف دیگر تقسیم عمودی آبخوان به لایه‌های مختلف، این تفکر را به وجود می‌آورد که باید پیوستگی عمودی آبخوان از نظر یک سامانه آب زیرزمینی برقرار باشد تا بتوان معادلات را به طور شبکه به شبکه حل کرد. که این قید خود یکی از معیارهای مهمی‌است که در دنیای پیچیده آب زیرزمینی، لزوما و همیشه برقرار نخواهد بود. به این‌صورت که تمام شبکه‌هایی که در مرز فوقانی قرار گرفته‌اند، باید اشباع باشند. در صورتی‌که این شبکه‌ها به طور ناگهانی خشک شوند (در اثر برداشت و یا خروجی زیرزمینی)، محاسبات از نظر فیزیکی مفهومی نخواهند داشت. حالت عکس این مساله هم ممکن است اتفاق بیافتد، به این نحو که نقاطی از سطح فوقانی که اکثرا خشک است، اشباع در نظر گرفته شود. این‌گونه اشتباهات منجر به ورود خطا در ابتدای محاسبات و تکثیر آن در مکان‌ها و زمان‌های بعدی خواهد شد. به همین جهت نگرش دیگری در شبکه‌بندی عمودی وجود دارد که در این نگرش هر لایه می‌تواند در نقاط مختلف دارای ضخامت و ابعاد مختلفی باشد، به‌طوری‌که هر شبکه به صورت مستقل با ابعاد مختلف، به عنوان یک آبخوان عمل کند. به طور مثال در مدل‌هایی مانند Mudflow، MT3D، در واقع مدل‌سازی به‌طور سه‌بعدی انجام نمی‌شود بلکه به صورت شبه‌سه‌بعدی[1] صورت می‌گیرد.

الف- معیارهای مهم در طراحی شبکه مکانی مدل

گرچه طراحی شبکه مدل به ظاهر ساده به نظر می‌رسد، ولی به دلیل این‌که یکی از حساس‌ترین مراحل مدل‌سازی، شبکه‌بندی منطقه مطالعاتی است، در زیر نکات اساسی و کاربردی در تعیین اندازه شبکه ذکر شده است:

- حتی‌الامکان شبکه‌ها طوری طراحی شوند که تمام محدوده مطالعاتی را در بر گیرند. معمولا هرچقدر وسعت منطقه مدل بزرگ‌تر باشد فواصل شبکه‌بندی بزرگ و هرچه دقت بیش‌تر مورد نیاز باشد، شبکه‌ها کوچک انتخاب می‌شوند.

1-Quasi three dimensionals

- هرچه اطلاعات و آمار ورودی مدل از نظر توزیع مکانی در دسترس باشد و کیفیت این آمار نیز در حد قابل قبول باشد، در این‌صورت برای اخذ نتایج بهتر، می‌توان ابعاد شبکه‌ها را کوچک‌تر انتخاب کرد.
- بسته به اهداف مدل، فواصل شبکه‌بندی در مناطقی که مورد تحقیق و مطالعه خاصی است مانند مناطق بحرانی (از نظر کیفی) کوچک‌تر انتخاب می‌شوند.
- در مناطقی که تغییرات محسوسی در پارامترهای هیدرودینامیکی و کیفی مدل وجود دارد، حتی‌الامکان گره‌ها نزدیک به هم در نظر گرفته شوند.
- در مناطقی که گرادیان (شیب) هیدرولیکی زیاد است و یا گرادیان غلظت زیاد است، توصیه می‌شود که فواصل شبکه‌ها کوچک‌تر انتخاب شوند.
- هرچه داده‌ها بیش‌تر و با کیفیت بهتری در دسترس باشد، برای اخذ نتایج دقیق‌تر می‌توان ابعاد شبکه‌ها را کوچک‌تر انتخاب کرد.
- در صورتی‌که آلودگی از طریق چاه جذبی به آبخوان انتقال داده شود و هدف حفاظت مناطق مجاور از آلودگی باشد، در این‌صورت تعداد شبکه‌ها زیادتر و ابعاد آن را کوچک‌تر انتخاب می‌کنند.
- در صورتی‌که رودخانه آلوده‌ای با آبخوان ارتباط هیدرولیکی داشته باشد و از نظر کیفی آبخوان را تحت تاثیر قرار دهد، در این‌صورت شبکه‌های مجاور رودخانه باید دارای ابعاد کوچک باشند.
- درصورتی‌که به علت برداشت بیش از حد از آبخوان پدیده[1] بالازدگی آب شور از لایه‌های تحتانی آبخوان در منطقه خاصی از آبخوان رخ دهد، شبکه‌های واقع در این منطقه و اطراف آن باید کوچک‌تر انتخاب شوند.
- درصورتی‌که پدیده تداخل آب شور و شیرین در کنار سواحل و یا دریاچه‌های داخل کویر رخ دهد به خصوص در ناحیه مرز تداخل (خط جداسازی آب شور و شیرین) شبکه‌ها باید کوچک‌تر انتخاب شوند.

معمولا در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی با توجه به وجود اطلاعات و آمار، ابعاد شبکه‌ها از ۵۰۰ متر تا ۲ کیلومتر در نظر گرفته می‌شوند که می‌تواند یا به صورت یکنواخت و یک اندازه انتخاب شود و یا متغیر باشد. البته ممکن است در صورت داشتن داده‌های بیش‌تر، در نقاط خاص ابعاد شبکه‌ها حتی به کم‌تر از ۱۰۰ متر نیز کاهش یابد. ضمن این‌که همان طوری‌که قبلا بیان شد، اهداف مدل‌سازی و مقیاس مساله هستند که ابعاد شبکه را دیکته می‌کنند.

نکته مهم در شبکه‌بندی مکانی در مدل کیفی این است که این شبکه‌بندی نمی‌تواند مستقل از شبکه‌بندی مدل کمی باشد و بلکه در صورتی‌که در یک آبخوان انجام مدل کمی و کیفی مورد نیاز باشد، در این صورت با توجه به شرایط طبیعی حاکم بر آبخوان، شبکه‌بندی را باید طوری انتخاب کرد که هم برای مدل کمی و هم برای مدل کیفی قابل اجرا باشد.

1- Upconing

در بعضی از مدل‌های کیفی مانند MT3D، SUTRA، FTWORKS، از همان شبکه‌هایی که در مدل کمی طراحی شده‌اند، استفاده می‌شود. در صورتی‌که در بعضی از مدل‌ها مانند خطوط مشخصه، هر شبکه مدل کمی به تعدادی شبکه ریزتر به عنوان زیر شبکه تقسیم می‌شوند.

۳-٤-۳- شبکه‌بندی زمانی یا تقسیم‌بندی زمانی

در شبیه‌سازی حالت غیرماندگار، طول کلی زمان مدل‌سازی به یک‌سری دوره‌های تنش (T) تقسیم می‌شوند که هر یک از این دوره‌ها به گام‌های زمانی کوچک‌تر (Δt) قسمت می‌شوند. دوره تنش در واقع دوره‌ای است که در آن پمپاژ، تغذیه و یا ارتباط هیدرولیکی با رودخانه صورت می‌گیرد. در فرآیند شبیه‌سازی و تهیه مدل ریاضی، واضح است که هرچقدر مقدار گام زمانی (Δt) کوچک‌تر انتخاب شود، مدت زمان لازم جهت محاسبات نیز افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر با کاهش گام زمانی، لزوما سازگاری حل معادلات افزایش نخواهد یافت بلکه باید در فرآیند حل براساس تامین شرایط پایداری، قیدها و معیارهای آن باید دریافت که آیا سازگاری حل معادلات افزایش می‌یابد و یا بالعکس. در شبیه‌سازی ریاضی آب‌های زیرزمینی (مدل‌های کمی)، با توجه به این‌که معمولا از فرمول‌بندی ضمنی برای حل معادلات جریان استفاده می‌شود، فرآیند حل معادلات بدون قید و شرط پایدار است، لذا هیچ‌گونه شرطی جهت انتخاب گام زمانی وجود ندارد و گام زمانی را می‌توانیم به طور دلخواه انتخاب کنیم. ضمن این‌که به منظور سرعت بخشیدن به مراحل حل، در مدل‌های کمی معمولا از گام زمانی تضریبی[1] (بین ۱ و ۱/۵)، استفاده می‌کنند. به این‌صورت که در یک دوره زمانی (T)، مقدار گام زمانی (Δt) در حین شبیه‌سازی با استفاده از یک ضریب افزایش می‌یابد. به طور مثال بجای اینکه $\Delta t = ۱$ و۲ و۳ و۴ ۰۰۰ باشد، بلافاصله پس از هر Δt عدد ۱/۵ به آن ضرب می‌شود. این عمل به خصوص در گام‌های زمانی دورقمی فرآیند حل را بسیار تسریع می‌بخشد.

برخلاف شبیه‌سازی جریان که می‌تواند هم در رژیم ماندگار و هم در رژیم غیرماندگار در نظر گرفته شود، معمولا شبیه‌سازی حمل مواد در طبیعت به صورت غیرماندگار است و همواره غلظت آبخوان تابعی از زمان می‌باشد. حتی زمانی که جریان آبخوان از یک رژیم ماندگار تبعیت کند. طبعا در شرایط خاص، به طور مثال در حالتی که یک جریان آلاینده به طور دائم و ثابت بخشی از آبخوان را مرتبا آلوده کند، در این‌صورت می‌توان رژیم آلایندگی را ماندگار در نظر گرفت.

همان‌گونه که قبلا ذکر گردید، در شبیه‌سازی کیفی در حالت غیرماندگار، زمان کل شبیه‌سازی به یک‌سری گام زمانی کوتاه مدت تقسیم می‌شود. فرض بر این است که در زمان کوتاه Δt، مقدار بده جریان و همچنین غلظت ورودی به محدوده مدل‌سازی ثابت خواهد ماند.

در شبیه‌سازی حمل مواد، گام‌های زمانی انتخابی به مراتب کوتاه‌تر از مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی می‌باشد و زمانی‌که بخواهیم از روش تفاضل‌های محدود و یا اجزا محدود برای حل معادلات استفاده کنیم، عدد کورانت به صورت زیر، معیاری جهت انتخاب گام زمانی می‌باشد:

$$C_r = \frac{\upsilon_x \Delta x}{\Delta_x} \qquad (۵۰-۳)$$

1- Multiplier

که در آن:

Cr : عدد کورانت (بدون بعد)

Δx : گام مکانی (L)

Δt : گام زمانی (T)

υx : سرعت آب (LT^{-1})

با توجه به این رابطه مقدار گام زمانی برابر خواهد بود با:

$$\Delta t = C_r \frac{\Delta x}{\upsilon_x} \qquad (۵۱-۳)$$

که با در نظر گرفتن عدد کورانت برابر با یک (Cr = ۱)، مقدار گام زمانی فقط تابعی از گام مکانی و سرعت حرکت آب می‌باشد:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\upsilon_x} \qquad (۵۲-۳)$$

در یک مدل سه‌بعدی که ترم نگه داشت جذبی (تاخیر جهت جذب شدن) وجود داشته باشد، گام زمانی از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta t = R.C_r.\min(\frac{\Delta x}{\upsilon_x}, \frac{\Delta y}{\upsilon_y}, \frac{\Delta z}{\upsilon_z}) \qquad (۵۳-۳)$$

که در آن R فاکتور نگه داشت جذب خطی می‌باشد.

زمانی که روش لاگرانژین و یا روش تلفیقی لاگرانژین- اولرین در شبیه‌سازی کیفی آبخوان مورد استفاده قرار می‌گیرد مقدار گام زمانی، مساله‌ای را در ایجاد خطا در محاسبات به وجود نمی‌آورد.

با وجود این، به دلیل این‌که تعقیب مسیر ذره آلوده به عنوان تقریب ترم جابه‌جایی در معادله آلودگی استفاده می‌شود، گام‌های زمانی مدل کیفی، باید طوری انتخاب شوند که باعث ناسازگاری حل معادلات نشوند.

وقتی که از روش اولر، رسته یک برای حل معادله دیفرانسیل معمولی برای تعقیب مسیر ذره آلوده استفاده می‌شود، معمولا عدد کورانت نباید از یک بیش‌تر باشد. درصورتی‌که با استفاده از روش‌هایی با رسته بالاتر مانند رانگ کوتا (رسته چهارم)، انتخاب عدد کورانتی بین ۱ و ۲ مناسب خواهد بود.

در شبیه‌سازی حمل مواد زمانی که از روش حل کاملا صریح استفاده شود، باید گام‌های زمانی کوچک‌تر انتخاب شود. به عنوان مثال در روش تلفیقی اولرین- لاگرانژین مانند روش خطوط مشخصه و یا در مدل MT3D، ترم جابه‌جایی از روش تعقیب مسیر ذره آلوده و ترم پخشیدگی از روش تفاضل‌های محدود صریح و یا از روش اجزا محدود حل می‌شود. در چنین حالتی، مقدار گام زمانی به دلیل برقراری شرط پایداری باید کوچک انتخاب شود.

برای مثال وقتی پخشیدگی با روش بلوک مرکزی تفاضل‌های محدود حل می‌شود، حداکثر گام زمانی برای یک حل پایدار در شبیه‌سازی سه‌بعدی برابر خواهد بود با:

$$\Delta t \le \frac{0.5R}{D_{xx}/(\Delta x)^2 + D_{yy}/(\Delta y)^2 + D_{zz}/(\Delta z)^2} \qquad (۵۴-۳)$$

که در آن D_{xx} D_{yy} D_{zz} ضرایب پخشیدگی در جهت x، y و z می‌باشد. و R فاکتور نگه داشت که قبلا تعریف شده است.

در شبیه‌سازی دو بعدی، مقدار گام زمانی برابر است با:

$$\Delta t \le \frac{0.5R}{D_{xx}/(\Delta x)^2 + D_{yy}/(\Delta y)^2} \qquad (۵۵-۳)$$

همان طوری‌که معادله اخیر نشان می‌دهد، در فرمول‌بندی صریح و در شبیه‌سازی سه‌بعدی، مقدار گام زمانی (Δt) به مراتب باید کم‌تر از گام زمانی در شبیه‌سازی دوبعدی باشد. از طرف دیگر چنان‌که مشهود است گام زمانی رابطه عکس با ضرایب پخشیدگی دارد، بنابراین درجایی‌که مقادیر ضریب پخشیدگی بالا باشد، گام زمانی باید کوچک‌تر انتخاب شوند.

بدیهی است درصورتی‌که علاوه بر ترم پخشیدگی، سایر ترم‌های معادله اصلی کیفیت آب‌های زیرزمینی از روش صریح حل شوند، باید شرایط پایداری با رعایت قیدهای لازم اعمال شود.

به طور خلاصه می‌توان بیان داشت که در تعیین گام زمانی در مدل‌های کیفی، عدد کورانت نقش اساسی دارد.

۳-٤-٤- شرایط مرزی

حل معادلات دیفرانسیل جزیی آلودگی آب‌های زیرزمینی مستلزم تعیین شرایط مرزی از نظر غلظت و استفاده از اطلاعات موجود در این مرزها می‌باشد. در غیر این صورت این معادلات غیرقابل حل خواهند بود.

تعیین شرایط مرزی یکی از مشکل‌ترین مراحل در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی می‌باشد. شرایط طبیعی مانند مرزهای غیرقابل نفوذ و همچنین مناطق تغذیه و تخلیه آبخوان، در اغلب موارد خیلی دورتر از محدوده مورد نظر در مدل قرار دارد. به نظر می‌رسد، بهترین کار در کاهش خطای تعیین شرایط مرزی، بسط و توسعه محدوده مدل تا سرحدهای طبیعی آبخوان است که در اکثر موارد به دلیل حجیم شدن محدوده کاری، امکان‌پذیر نیست.

از طرف دیگر، عدم وجود یک شبکه خوب اندازه‌گیری غلظت آلودگی در آبخوان، انتخاب محدوده وسیعی را در مدل‌سازی توجیه نمی‌کند. محدوده بزرگ مدل‌سازی با اطلاعات و آمار اندک، نه تنها کمکی به اهداف مدل‌سازی نمی‌کند بلکه باعث خطای بیش‌تر به واسطه بالا رفتن عدم قطعیت، در نتایج می‌شود. لذا محدوده بیلان و مدل در بیش‌تر حالات با محدوده آبخوان متفاوت است.

از طرف دیگر همان طوری‌که ذکر شد، مرزهای آبخوان عموما به صورت خطوط مستقیم نیستند در حالی‌که در شبکه‌بندی، مرزهای مدل به صورت خط مستقیم در نظر گرفته می‌شوند و در نتیجه مرزهای مدل کاملا بر مرزهای طبیعی محدوده بیلان آبخوان منطبق نبوده و بین این دو تفاوت جزیی وجود دارد. بدیهی است که این تفاوت، زمانی حایز اهمیت بیش‌تری می‌شود که تعیین شرایط مرزی به دلیل ساختار خاص زمین‌شناسی خیلی پیچیده باشد.

به طور کلی سه نوع شرط مرزی در مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی وجود دارد:

الف- غلظت مشخص (شرایط دیریکله)

ب- تغییرات غلظت مشخص یا جریان توزیع آلودگی مشخص (شرایط نیومن)

ج- تلفیق دو شرط الف و ب (شرایط کُشی)

۳-٤-۵- شرط مرزی غلظت معلوم

در این نوع شرط مرزی، غلظت آب در روی مرز معلوم می‌باشد. مثلا در مخازن نفتی که دارای غلظت مشخصی می‌باشد، درصورتی‌که بخواهیم نحوه نفوذ و یا نشت این مخازن را به درون آبخوان از طریق مدل بررسی کنیم، در این‌صورت شرط مرزی

فوقانی را می‌توانیم غلظت مشخص در نظر بگیریم. یا به طور مثال در اراضی کشاورزی تحت آبیاری همراه با کود شیمیایی، می‌توان سطح فوقانی آبخوان را مرز با غلظت مشخص در نظر گرفت. درصورتی‌که چاه جذبی عامل آلودگی آبخوان باشد، باتوجه به نوع آلاینده‌ها، غلظت مشخص خواهد شد. بنابراین در این‌گونه موارد نیز مرز با غلظت معلوم و مشخص انتخاب می‌شود.

۳-٤-٦- شرط مرزی تغییرات غلظت معلوم

در این نوع شرط مرزی، مقدار تغییرات غلظت در نقاط مختلف مرزی مشخص می‌باشد و در نتیجه مقدار جریان پخشیدگی معلوم است. در عمل، به دلیل این‌که میزان پخشیدگی مواد در حین ورود یا خروج از یک گره مرزی (یا به عبارت دیگر تغییرات غلظت در دو مرز) بسیار ناچیز می‌باشد، معمولا در فرآیند مدل‌سازی این نوع شرط مرزی به ندرت استفاده می‌شود.

به همین دلیل شرط نوع سوم که تلفیقی از شرایط «الف» و «ب» است با حذف ترم تغییرات غلظت معلوم (شرط نوع دوم) تبدیل به شرط نوع اول یعنی مرز با غلظت معلوم می‌شود.

قابل ذکر است که در اکثر مراجع بین‌المللی در تعیین شرایط مرزی در مدل‌های کیفی، آن چه را که توصیه می‌کنند، شرط نوع اول یعنی شرایط دیریکله و با غلظت معلوم است در نظر گرفتن غلظت متغیر نسبت به مکان در شرایط خاصی وجود دارد، از طرف دیگر برای حل معادلات دیفرانسیل جزیی آلودگی، در شرایط غیرماندگار باید مقدار آمار غلظت، به صورت لحظه‌ای وجود داشته باشد که عملا به جز در شرایط خاص، امکان‌پذیر نیست.

۳-٤-۷- نقش شرایط مرزی مدل کمی در حمل مواد

یکی از شرایط مرزی رایج در شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی (مدل‌های کمی)، مرز با بده معلوم است. به این صورت که همواره مقدار آبی بین خارج و داخل محدوده مدل‌سازی مبادله می‌شود. این نوع شرط مرزی در فرآیند تهیه مدل برای یک منطقه، میزان بده آب در هر یک از شبکه‌های مرزی باید محاسبه و به مدل داده شود. این بده در هر یک از دوره‌های تنش (T) ثابت، ولی از یک دوره به دوره دیگر تنش متفاوت خواهد بود. حالت خاص این نوع شرط مرزی، مرز با بده صفر می‌باشد که نشان دهنده عدم تبادل آب در مرز مدل می‌باشد. در این حالت مقدار بده در کلیه دوره‌های تنش برابر صفر منظور می‌شود.

شرط دیگر مرزی، مرز با بار هیدرولیکی معلوم است، به این صورت که مقدار پتانسیل هیدرولیکی در مرز و در دوره تنش معلوم و مشخص می‌باشد. بدیهی است که مقدار بار هیدرولیکی وابستگی شدید به فرایند تبادل مقدار آب در ناحیه مرزی دارد. مقدار جریان مرزی، خود تابعی از تفاضل سطح آب در داخل و خارج منطقه مدل می‌باشد. در این حالت مقدار بده تبادل در شبیه‌سازی برای هر مرحله زمانی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Qs=K_{cond}\ (h_s-h_{aq}) \qquad (۵۶-۳)$$

که در آن:

h_s : سطح آب آبخوان در خارج منطقه (L)

H_{aq} : سطح آب آبخوان در داخل منطقه (L)

K_{cond} : ضریب تبادل در ناحیه مرزی (L^2T^{-1})

Q_s : بده تبادل (L^3T^{-1})

از بین مرزهای فوق، ساده‌ترین آن مرز با بده صفر است. در این حالت گرادیان هیدرولیکی صفر بوده و در نتیجه مولفه سرعت در آن صفر و مقدار بده تبادل برابر با صفر می‌شود. در چنین وضعیتی، پدیده انتقال و جابه‌جایی از مرز به داخل محدوده مدل‌سازی صورت گرفته و در نتیجه انتقال مواد از داخل و یا بالعکس انجام نمی‌شود.

از طرف دیگر، چنان‌چه مرزها نفوذپذیر باشد و جابه‌جایی جریان آب در آن بسیار کند صورت گیرد (طوری‌که گرادیان هیدرولیکی بسیار کم و قابل صرف‌نظر کردن باشد)، در این حالت نیز مقدار پخشیدگی مواد محلول برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. گرچه از نظر تئوری در مرز با بده صفر، لزوما پخشیدگی برابر صفر نیست ولی به دلیل اندک بودن آن قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. بنابراین در اکثر حالات مرز با بده صفر در مدل کمی، مرز با پخشیدگی مواد محلول برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

دقت شود، در شرایط خاص مانند بعضی از مناطق ایران به خصوص در کویرهای مرکزی با این‌که در ناحیه مرزی با سازند غیرقابل نفوذ مواجه می‌شویم که قاعدتا روند رد و بدل شدن جریان آب زیرزمینی در آن به وقوع نمی‌پیوندد، ولی امکان برقرار شدن واکنش شیمیایی بین آب آبخوان و مواد جامد سازند (براساس نوع آن) وجود دارد. با توجه به وجود چنین مساله‌هایی، در ناحیه مرزی مرتبا غلظت آب آبخوان تغییر می‌کند. بنابراین در این‌گونه حالات خاص نمی‌توان بیان کرد که در مرزهای غیرقابل نفوذ و با بده صفر، تبادل کیفی نیز لزوما صفر است. در فرآیند مدل‌سازی در این‌گونه مناطق دو حالت ممکن است، به وجود بیاید:

الف- اگر نمونه‌برداری‌ها در نقاط مختلف ناحیه مرزی نشان دهد که تغییر غلظت آب در مدل کمی، اندک و قابل صرف‌نظر کردن باشد. در این‌حالت مرز با بده صفر را به سهولت می‌توان مرز با غلظت صفر در نظر گرفت.

ب- اگر نمونه‌برداری‌ها در نقاط مختلف ناحیه مرزی گواه این باشد که تغییرات غلظت در آن منطقه زیاد است (چه تغییرات مکانی و چه تغییرات زمانی)، در این‌صورت باید مقدار غلظت پس از آزمایش شیمیایی نمونه‌های برداشت شده تعیین و معلوم شود تا بتوان به مدل کیفی مرز با غلظت معلوم را معرفی کرد.

در صورتی‌که جریان بین ناحیه مرزی برقرار باشد در این‌صورت باید این مقدار یا از قبل محاسبه و به مدل داده شود و یا در حین فرآیند شبیه‌سازی محاسبه شود. طبیعتا مقدار آن در هر زمان و هر شبکه متفاوت خواهد بود.

در این‌گونه مرزها، با توجه به وجود بده تبادل، همواره غلظت مواد نیز به همراه جریان از مرزها به داخل محدوده مدل‌سازی برقرار می‌باشد. در صورتی‌که مرز مدل جریان با مدل آلودگی در حالت شرط مرزی غلظت معلوم (شرط نوع اول، دیریکله و یا بخشی از شرط نوع سوم، کشی)، منطبق باشد در چنین حالتی میزان مواد محلول ورودی و خروجی در هر گره برابر با $Q_s C_b$ خواهد بودکه در آن C_b، غلظت معلوم می‌باشد.

در صورتی‌که غلظت در روی مرز معلوم نباشد، دوحالت اتفاق می‌افتد.

الف- زمانی‌که در یک شبکه مرزی، تخلیه‌ای از آبخوان صورت گیرد در این حالت بده خروجی معلوم است (یا از قبل معلوم بوده و یا توسط مدل محاسبه شده و معلوم می‌باشند) و میزان خروجی مواد محلول از منطقه مدل برابر با Q_sC_a خواهد بود. (C_a غلظت محاسبه شده در آب زیرزمینی در شبکه مزبور می‌باشد).

ب- زمانی‌که در یک شبکه مرزی تغذیه وجود داشته باشد، در این حالت نیز مقدار بده تغذیه یا معلوم است و یا در حین فرآیند شبیه‌سازی محاسبه و معلوم می‌شود. میزان ورودی مواد محلول به محدوده داخلی مدل برابر با $Q_s.C_s$ خواهد بود. (C_s غلظت آب ورودی به هر شبکه است). مقدار C_s باید از قبل برای شبکه‌ای که پتانسیل دریافت آب را دارد، مشخص و معلوم باشد.

۳-٤-۸- مقایسه بین شرایط مرزی در مدل‌های جریان و آلودگی

با وجود این‌که از نظر ظاهری تشابهی بین شرایط مرزی مدل‌های کمی و کیفی وجود دارد، ولی اثر آنها بر فرآیند شبیه‌سازی معادلات یکسان نیست. به طور مثال مرز با غلظت معلوم در معادلات کیفی مشابه مرز با بار هیدرولیکی معلوم در معادلات جریان می‌باشد. در صورتی‌که فرآیند ورود مواد محلول از ناحیه مرزی در بررسی آلودگی نسبت به مدل جریان به مراتب پیچیده‌تر است. به دلیل این‌که مواد محلول می‌تواند از طریق راه‌های مختلف (بیولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی) سامانه را تحت تاثیر قرار دهند.

شرایط مرزی بده معلوم در معادلات جریان نیز مانند غلظت معلوم در معادلات حمل مواد می‌باشد. مقدار آب ورودی و خروجی در مدل کمی تابعی از گرادیان هیدرولیکی است. در صورتی که در مدل کیفی فقط بخشی از فرآیند پخشیدگی توسط گردایان غلظت محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر شرط مرزی در حمل مواد، به تنهایی قادر نیست میزان کامل مواد محلول ورودی و یا خروجی از مرزها را مشخص کند. به منظور این‌که بتوان به طور دقیق و کامل مقدار حمل مواد را در نواحی مرزی محاسبه کرد باید شرط مرزی، بده معلوم، در معادلات جریان و شرط مرزی تلفیقی غلظت معلوم و گرادیان غلظت معلوم در مدل کیفی، فراهم باشد. به بیانی دیگر شرط مرزی دیریکله در مدل جریان و شرط مرزی کُشی در مدل آلودگی باید برقرار باشد تا بتوان میزان کامل ورودی و خروجی مواد محلول را در فرآیند شبیه‌سازی محاسبه کرد.

۳-٤-۹- مساله مقیاس در شبیه‌سازی جریان و حمل مواد

مساله مقیاس در شبیه‌سازی معادلات جریان و حمل مواد یکی از مسایلی است که می‌تواند تاثیر مهمی بر روی نتایج خروجی مدل داشته باشد. مدل ریاضی جریان در آب‌های زیرزمینی اغلب در مقیاس‌های منطقه‌ای و یا در دشت‌های نسبتا وسیع تهیه می‌شود. در حالی‌که مدل ریاضی آلودگی آبخوان اکثرا با توجه به هدف مدل‌سازی در مقیاس موضعی مورد نیاز می‌باشد. طراحی شبکه‌هایی با ابعاد یکسان در مدل کمی و کیفی، منجر به محاسبات غیرضروری در شبکه‌هایی که اصولا مشکل آلودگی ندارند، می‌شود. در بعضی از مدل‌ها، ناحیه‌ای که متاثر از آلاینده خاصی است را جدا کرده و مرزهای آن را مرز با مقدار عبوری صفر برای مواد محلول در نظر می‌گیرند. به این ترتیب در محاسبات معادلات آلودگی فقط این بخش نقش دارد و در سایر مناطق مدل فقط محاسبات جریان انجام می‌شود (مانند مدل MT3D).

در بعضی از مدل‌ها، در مدل جریان ابعاد شبکه‌ها بزرگ‌تر طراحی می‌شوند و در نواحی متاثر از آلودگی زیر شبکه‌هایی را می‌توان ایجاد کرد که فقط در این مناطق معادلات آلودگی حل شود (به طور مثال در مدل MOC).

نگرشی دیگر در مورد مساله مقیاس در مدل‌سازی و تطبیق مقیاس در مدل‌های جریان و آلودگی به این نحو است که در ابتدا اندازه شبکه‌های مدل جریان (در مقیاس منطقه‌ای)، بزرگ‌تر انتخاب می‌شود (شرایط مرزی سعی می‌شود تا منتهی‌الیه مرزهای طبیعی منطقه بسط داده شود)، بعد از این مرحله، یک مدل موضعی جریان با شرایط مرزی میان‌یابی شده از مدل منطقه‌ای، تهیه می‌شود (در واقع یک پل ارتباطی بین دو مدل با مقیاس منطقه‌ای و موضعی ایجاد می‌شود). سپس معادلات حمل مواد حل و یا مدل‌سازی آلودگی در مقیاس موضعی انجام می‌شود. به عبارت دیگر در این نگرش ابتدا براساس مدل منطقه‌ای، یک مدل موضعی جریان تهیه و سپس براساس آن مدل آلودگی در مقیاس موضعی تهیه می‌شود.

۳-٤-۱۰- شرایط اولیه

شرایط اولیه در مدل‌های کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی به منظور شبیه‌سازی سامانه آبخوان در حالت غیرماندگار ضروری می‌باشد. همان طوری‌که می‌دانیم، در شبیه‌سازی کمی آبخوان شرایط اولیه در حالت غیرماندگار منتج شده از شبیه‌سازی حالت ماندگار می‌باشد. در مدل‌های کیفی، تعیین شرایط اولیه در واقع بستگی به اهداف مدل‌سازی دارد. به طور مثال ممکن است هدف از شبیه‌سازی کیفی یک آبخوان به صورت‌های زیر باشد:

- آگاهی و شناخت بهتر رژیم کیفی آبخوان
- ارزیابی روند آلودگی ناشی از یک آلاینده در گذشته تا حال
- پیش‌بینی آلودگی سامانه در آینده براساس عملکرد یک آلاینده فعلی

بر این اساس، مشخص است که شرایط اولیه می‌تواند متفاوت در نظر گرفته شود. بهترین حالت و یا شرایط ایده‌آل، این است که داده‌های اندازه‌گیری شده کیفیت آب در سطح آبخوان و در نقاط مختلف و زمان‌های گوناگون وجود داشته باشد. به طور مثال، در یک منطقه‌ای، برای ماه‌ها و سال‌های مختلف (مثلا ۱۳۸۰-۱۳۷۰)، مقادیر غلظت را در چاه‌های نمونه‌برداری کیفی در دسترس باشد. در این‌صورت یک سال و یا یک ماه را می‌توان به عنوان زمان شروع محاسبات در نظر گرفت تا براساس آن مقدار غلظت در زمان‌های بعدی (براساس روش عددی مناسب) محاسبه شود. معمولا چنین حالتی (وجود شبکه وسیع نمونه‌برداری در مکان‌های مختلف یک آبخوان و در زمان‌های مختلف) به‌جز در بررسی آلودگی در بخش کوچکی از یک دشت بزرگ میسر نیست. بنابراین بهتر است با در دست داشتن غلظت در چاه‌های نمونه‌برداری موجود و میان‌یابی کردن آن توسط روش‌های معمول مانند کریجینگ و با تبادل نظر با هیدروژئولوگ طرح، مقادیر غلظت را در کلیه نقاط آبخوان به‌دست آید. با در دست داشتن نقشه هم غلظت، شرایط اولیه برای شروع محاسبات در حالت غیرماندگار مهیا می‌باشد. به طور مثال می‌توان نقشه مجموع املاح خشک (TDS)، کلر (Cl) یا هدایت الکتریکی آب (EC) را در یک ماه و یا یک سال خاص به عنوان داده‌های مبنا به مدل وارد کرد.

با اعمال این نقشه به مدل و تاثیر آلاینده‌ها، می‌توان در گام‌های زمانی بعدی عکس‌العمل آبخوان را در مقابل آلاینده‌ها برروی غلظت اولیه آبخوان با استفاده از مدل شبیه‌سازی بررسی کرد.

قابل ذکر است که درتعیین سال مبنا و یا شرایط اولیه بهتر است در صورتی که روند تغییرات کیفی آب آبخوان در سال‌های مختلف در دست باشد، سالی را به عنوان مبنا انتخاب کرد که تغییرات پارامتر کیفی موردنظر در طی ماه‌های مختلف آن سال قابل ملاحظه نباشد.

۳-٤-۱۱- عوامل تغذیه و تخلیه

تخلیه و تغذیه آبخوان در واقع مکانیسم آب ورودی و خروجی از آبخوان را نشان می‌دهد که در مدل‌های کمی مد نظر قرار می‌گیرد. در مدل‌های کیفی آگاهی از میزان تغذیه و تخلیه و به خصوص غلظت مواد محلول آن به عنوان یکی از ورودی‌های مدل بر روی محاسبه غلظت در سایر نقاط تاثیر می‌گذارد. میزان جریان ورودی و یا خروجی معمولا در مطالعات پایه آب‌های زیرزمینی محاسبه و برآورد می‌شود که در حین فرایند واسنجی مدل تصحیح می‌شود.

به طور کلی تغذیه و تخلیه در محدوده منطقه مدل به دو صورت خارجی و داخلی به وقوع می‌پیوندد.

- تغذیه و تخلیه خارجی، منظور مقدار آبی است که از ناحیه مرزهای منطقه وارد و یا خارج می‌شود. مقدار آن براساس شرایط زمین‌شناسی و تفسیر هیدروژئولوگ طرح از جریان حاکم بر آبخوان می‌باشد که باتوجه به سه نوع شرایط مرزی، بار هیدروژئولیکی معلوم، بده معلوم و بده وابسته بار هیدرولیکی مقدار آن متفاوت خواهد بود.
- تغذیه و تخلیه داخلی که منظور مقدار ورودی و خروجی سامانه آبخوان در محدوده مدل می‌باشد. (به طور مثال، چاه پمپاژ یا چاه تزریق، زهکش‌ها، تغذیه طبیعی ناشی از بارندگی و یا آبیاری، تخلیه به صورت تبخیر و ورودی- خروجی در سامانه آبخوان – رودخانه و یا آبخوان دریاچه

در شبیه‌سازی سه‌بعدی، تغذیه و تخلیه از سطح زمین مانند تبخیر و نشت می‌تواند به عنوان شرط مرزی در سطح فوقانی منظور شود. به طور کلی در اکثر نرم‌افزارها تفاوت چندانی در نحوه اعمال شرایط مرزی و تخلیه و تغذیه داخلی وجود ندارد. به طور مثال در Mudflow و MT3D، یک چاه می‌تواند به عنوان یک منبع ورودی (چاه تزریق) و یا یک منبع خروجی (چاه بهره‌برداری) و یا شرط مرزی با بده معلوم و یا با غلظت معلوم در یک شبکه مرزی مدل منظور شود.

در بعضی مواقع فرآیند ورودی – خروجی مانند شرط مرزی بده تابع بار هیدرولیکی، شبیه‌سازی می‌شود. به طور مثال تخلیه و زهکشی آبخوان در سامانه رودخانه – آبخوان و یا تخلیه توسط تبخیر مستقیم از سطح آب آبخوان را می‌توان نام برد. معمولا در این‌گونه موارد با توجه به آمار آبدهی رودخانه و یا سطح آب آبخوان، ابتدا می‌توان حداکثر مقدار آب خروجی آبخوان را برآورد کرد و سپس در فرآیند واسنجی مدل، این مقدار را تصحیح کرد.

- غلظت آب ورودی و خروجی

در فرآیند شبیه‌سازی کیفی آبخوان، همان‌گونه که غلظت در مرزهای محدوده مدل باید معلوم باشد، غلظت آب ورودی در هر یک از شبکه‌های مدل لازم است که از قبل مشخص شده باشد.

معمولا غلظت آب برداشتی (خروجی) برابر با غلظت محاسبه شده در شبکه‌ای که در آن بهره‌برداری و برداشت آب وجود دارد، درنظر گرفته می‌شود. بنابراین یک چاه بهره‌برداری، غلظتی معادل $Q_w C_a$ (که در Q_w بده چاه و C_a غلظت محاسبه شده در شبکه‌ای که چاه وجود دارد، می‌باشد)، از آبخوان خارج می‌کند. از طرف دیگر یک چاه تزریقی غلظتی معادل $Q_w C_s$ (که در آن Q_W بده تزریق شده به آبخوان از طریق چاه و Cs، غلظت آب تزریق شده که باید از قبل مشخص شده باشد)، را به آبخوان تحمیل می‌کند. به همین ترتیب، غلظت آبی که توسط جریان‌های زیرزمینی از محدوده آبخوان به خارج از مرزها منتقل می‌شود، براساس غلظت محاسبه شده مدل در نظر گرفته می‌شود. در حالتی که جریان نفوذ آب از سطح زمینی به آبخوان وجود دارد، (نفوذ ناشی از بارندگی، آبیاری یا نشت از مخازن مواد نفتی، نشت از محل دفن زباله‌ها و رودخانه) در این صورت میزان غلظت ورودی به آبخوان باید مشخص شود. ضمن این‌که برآورد مقدار غلظت در چنین حالت‌هایی به دلیل گذر آب از سطح زمین به محیط غیراشباع و سپس به محیط اشباع پیچیده می‌باشد را نمی‌توان به سهولت انجام داد. فرایندهای مختلف شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی برآورد و دقیق غلظت ورودی از طریق نفوذ را به داخل آبخوان مشکل می‌سازد.

نکته مهم در این بحث، این است که باتوجه به نوع آلاینده و فرآیند ورود آب به یک آبخوان (نقطه‌ای و یا توزیعی و یا خطی)، مقدار غلظت ورودی نسبت به زمان متغیر خواهد بود. در این‌صورت بدیهی است که نمی‌توان غلظت آب نفوذی به آبخوان را همواره

ثابت در نظر گرفت. ضمن این‌که در مدل‌های کیفی، پارامتر غلظت یکی از عناصری است که در فرایند واسنجی مدل تصحیح و برای منطقه تنظیم می‌شود.

۳-٤-۱۲- مدیریت داده‌ها

با توجه به تنوع مدل‌ها و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و نحوه پذیرش داده‌ها در هر یک و ارائه متفاوت نتایج، مدیریت داده‌ها و فرآیند مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی از اهمیت به سزایی برخوردار است. پردازش و مدیریت داده‌ها به دو مرحله پیش‌پردازش و پس‌پردازش تقسیم می‌شوند که در زیر توضیح داده می‌شود.

۳-٤-۱۳- پیش پردازش[1]، پس پردازش[2]

فرایند آماده‌سازی داده‌های ورودی و نحوه ورود آن به یک مدل عددی، اصطلاحا پیش‌پردازش و ارائه نتایج شبیه‌سازی‌های مختلف پس‌پردازش نامیده می‌شود.

از آنجایی‌که داده‌های ورودی مورد نیاز در شبیه‌سازی جریان و حمل مواد در آبخوان در مقیاس سه‌بعدی، حجم قابل ملاحظه‌ای دارند، لذا مدیریت داده‌ها به شخص مدل‌ساز در حین تهیه مدل و به افراد مدیر و تصمیم‌گیرنده در ارزیابی نتایج کمک شایانی می‌کند. به طور کلی ۵ مرحله در پیش پردازش داده‌ها لازم است:

۱- طراحی شمای شبکه‌بندی افقی و عمودی برای داده‌های مکانی مانند فاصله شبکه‌ها، ضخامت لایه و اعمال شرایط مرزی.
۲- پیاده کردن ضرایب هیدرولیکی و حمل مواد برای هر شبکه و یا گره
۳- در صورتی‌که ضرایب به طور یکنواخت به شبکه‌ها و یا به طور یکسان برای مناطق خاصی (از طریق منطقه‌بندی)، داده نشود، لازم است با استفاده از نقاط مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده مقدار این ضرایب برای کلیه شبکه‌ها از طریق میان‌یابی مکانی محاسبه شوند.
۴- در صورت تهیه مدل در رژیم غیرماندگار، شبکه‌بندی زمانی و یا تقسیم‌بندی زمانی نیز باید انجام شود. سپس شرایط اولیه و داده‌های مربوط به آن به مدل اعمال شود.
۵- جمع‌آوری دبی‌های ورودی و خروجی اعم از محل، مقدار و میزان تبادل هیدرولیکی و معلوم کردن غلظت مواد محلول ورودی
۶- انتخاب راه‌حل مناسب و برآورد پارامترهای مربوط به آن راه‌حل (به طور مثال اگر محدودیتی برای پایداری روش حل است، باید این محدودیت در طراحی فاصله شبکه‌ها و انتخاب گام زمانی مناسب اعمال شود.)

پیش‌پردازش ممکن است به طور دستی و با استفاده از نرم‌افزارهایی چون Excel، Acces، Word و یا به طور اتوماتیک توسط افزودن یک‌سری زیربرنامه به برنامه اصلی شبیه‌سازی، انجام شود.

1- Preprocessing
2- Post processing

به دلیل این‌که شخص مدل‌ساز در روش دستی مرتبا با داده‌ها برخورد دارد، لذا برای افراد مبتدی این روش بیش‌تر توصیه می‌شود تا شناخت مناسبی از سامانه حاکم بر آبخوان پیدا کند. درصورتی‌که برای افراد مجرب، با توجه به تجربه‌کاری آنها درآبخوان‌های مختلف روش خودکار روند مدل‌سازی را تسریع خواهد کرد.

پس پردازش عملیاتی است که برای ارائه بهتر نتایج شبیه‌سازی انجام می‌شود. این پردازش در دو مرحله می‌تواند در فرآیند تهیه مدل ریاضی آبخوان مفید و موثر باشد.

الف- در مرحله واسنجی، شخص مدل‌ساز باید بتواند به سهولت نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهده شده را مقایسه کند. تا براساس آن بتواند در مورد تعویض و یا انتخاب نهایی پارامتر قضاوت کند. بنابراین هر چقدر نتایج بهتر ارائه شده و در دسترس باشد، این مرحله سریع‌تر انجام می‌شود.

ب- پس از تهیه مدل، در اکثر مواقع توقع این است که از مدل جهت ارزیابی عکس‌العمل گزینه‌های مختلف بهره‌برداری و یا تزریق کمی و کیفی آبخوان استفاده شود. در این‌گونه موارد نیز ارائه خوب نتایج حاصل از اجراهای مختلف مدل می‌تواند به شخص مدیر در انتخاب گزینه بهتر کمک کند.

مهم‌ترین موارد خروجی مدل که می‌تواند برروی آن عملیات پس پردازش را انجام داد، عبارتند از:

- مقادیر باقیمانده تفاوت بین بار هیدرولیکی و یا غلظت محاسبه شده توسط مدل و مشاهده شده در چاه‌های مشاهده‌ای و یا نمونه‌برداری کیفی
- هیدروگراف و یا منحنی غلظت در چاه‌های مختلف
- نقشه پتانسیل هیدرولیکی و هم غلظت برای منطقه مدل و یا بخشی از منطقه که مورد توجه خاص می‌باشد.
- بیلان جریان و مواد محلول در یک منطقه کوچک

بیلان ورودی و خروجی جریان و مواد محلول در یک منطقه کوچکی از کل منطقه مدل، در منطقه‌ای که ورودی و خروجی صورت می‌گیرد. (متذکر می‌شود که اکثر مدل‌ها مقدار بیلان به طور جامع و یکپارچه برای منطقه اعمال می‌شود، در صورتی‌که بهتر است با توجه به پستی و بلندی و شرایط هیدروژئولوژیک، این مقدار در مقیاس موضعی محاسبه شود).

۵- مسیر جریان، زمان عبور و منطقه تحت تاثیر جریان و مواد محلول در زمان‌های خاص

گرچه پردازش و مدیریت داده‌ها ظاهرا وقت‌گیر به نظر می‌رسد ولی تجارب به‌دست آمده در یک پروژه را می‌توان به سایر پروژه‌ها انتقال داد و در نتیجه منجر، به زمان کم‌تری خواهد شد. ضمن این‌که با پیشرفت کامپیوتر و وجود نرم‌افزارهای مختلف، این مرحله را می‌توان به سهولت و با زمان قابل قبولی انجام داد.

۳-٤-۱٤- استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

سامانه اطلاعات جغرافیایی مجموعه‌ای است که بهره‌گیری از امکانات علمی، دست‌یابی به اطلاعات، پردازش داده‌ها و استخراج نتایج را در کم‌ترین زمان، ممکن می‌سازد. در این راستا در مدل‌سازی آبخوان بهتر است از سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده شود تا بتوان اطلاعات ورودی و خروجی مدل را به صورت مدون و در قالب سطوح اطلاعات مختلف تهیه و ارائه نمود.

همان طوری‌که می‌دانیم تحلیل‌های هیدروژئولوژی با توجه به خصوصیات پدیده‌های مورد بررسی نسبت به نتایج مکانی و زمانی داده‌ها، بسیار حساس می‌باشد. معمولا اطلاعات موجود قبل از استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی نیاز به پیش پردازش و مدیریت دارد. توسعه بانک‌های اطلاعاتی به موازات پیشرفت علوم کامپیوتر، ابزار قدرتمند دیگری به نام سامانه اطلاعات جغرافیایی را در اختیار قرار داده، که این امکان را به وجود می‌آورد. تا قبل از سال ۱۹۹۰ میلادی، سامانه اطلاعات جغرافیایی در مطالعات منابع آب مورد استفاده قرار نمی‌گرفت. به تدریج که قابلیت‌های این سامانه شناسایی شد، سعی شد که از آن در مطالعات و تحقیقات در زمینه منابع آب و همچنین آب‌های زیرزمینی استفاده شود. روی این اصل، موسسات تولیدکننده نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی سعی نمودند، توابع مورد نیاز در تحلیل‌های هیدرولوژیکی را به نرم افزارهای خود بیافزایند. به دلیل این‌که معمولا نرم افزارهای شبیه‌سازی فاقد سامانه اطلاعات جغرافیایی هستند، لذا ضروری است که برای استفاده‌کننده شرایطی را فراهم کرد تا بتواند ارتباط نرم افزار شبیه‌سازی را با محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی برقرار کند. براین اساس رفته رفته مدل‌های ریاضی تلفیقی توسعه یافت. به‌طوری‌که در کنار یک نرم افزار، به شبیه‌سازی سامانه هیدرولیکی و هیدرولوژیکی پرداخته و از نرم افزار موجود جهت مدیریت داده‌های ورودی، پردازش آنها و نمایش نتایج حاصل از مدل‌ها استفاده می‌نمایند.

در ارتباط با شبیه‌سازی عددی آبخوان، از سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌توان در جهت مدیریت داده‌ها، تحلیل‌های آماری، پردازش تصویر و نقشه‌ها و تبادل اطلاعات، تغییر ساختار فرمت داده‌ها و پیش پردازش اطلاعات مورد نیاز مدل، استفاده کرد.

تفسیر نتایج شبیه‌سازی و نمایش نتایج به صورت مستقیم و غیرمستقیم از دیگر توانایی‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی در تلفیق شدن با مدل‌های عددی می‌باشد. روی این اصل می‌توان سامانه اطلاعات جغرافیایی را بستر مطالعات هیدروژئولوژیکی دانست. از ترکیب مدل‌های آب زیرزمینی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در زمینه‌های مختلفی مانند: مطالعات پایه آب‌های زیرزمینی، ارتباط منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، بررسی‌های زیست محیطی و آلودگی آب‌های زیرزمینی، مدیریت بهره‌برداری و تشکیل پایگاه‌های اطلاعاتی منابع آب زیرزمینی استفاده می‌شود. یک سامانه اطلاعات جغرافیایی فعال نیاز به سه جز اصلی دارد:

۱- محیط کار با مجموعه نرم‌افزار و سخت‌افزار
۲- داده‌ها و اطلاعات مربوط به موضوع مورد مطالعه
۳- نیروی انسانی متخصص در استفاده از این سامانه

- اطلاعات پایه در سامانه اطلاعات جغرافیایی

در یک سامانه، اطلاعات پایه و بستر هندسی اطلاعات جغرافیایی، نقشه است و با تلفیق سایر اطلاعات کمی و کیفی در یک سامانه واحد، امکان مراجعه به هر طبقه از اطلاعات فراهم می‌شود. با قرار دادن یک نوع اطلاعات در یک لایه مانند محل چاه‌های برداشت نهایی، تغذیه آبخوان، زهکش آبخوان و رقوم سطح آب زیرزمینی در نقاط مشاهده شده، اطلاعات جغرافیایی در یک لایه ازسطوح اطلاعات ذخیره می‌شوند و هر یک از لایه‌ها را می‌توان به صورت ترکیب از دو یا چند لایه در سامانه اطلاعات دریافت نمود.

نوع لایه اطلاعاتی در یک پایگاه سامانه اطلاعات جغرافیایی براساس نوع مطالعه مشخص می‌شود. گرچه مطالعات در زمینه‌های مختلف به وسیله سامانه اطلاعات جغرافیایی خیلی شبیه به هم هستند، اما تفاوت آنها در نوع لایه‌های اطلاعاتی که جهت بررسی و مطالعه نیاز دارند، می‌باشد. در هر صورت لایه‌های اطلاعاتی در یک سامانه اطلاعات جغرافیایی به صورت نقشه بوده و یا به شکل

نقشه در آمده است. اطلاعاتی که در سامانه اطلاعات جغرافیایی ذخیره می‌شود معمولا از نوع اطلاعات مکانی هستند و چون لایه‌های مورد استفاده در مدل آب زیرزمینی باید به صورت مکانی وارد شوند، لذا انتقال این لایه‌ها از محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی به داخل مدل آب زیرزمینی می‌تواند به آسانی انجام شود. همان طوری‌که قبلا ذکر گردید، اطلاعات ورودی به سامانه سامانه اطلاعات جغرافیایی در مدل کیفی آب زیزمینی، نقشه مجموع مواد خشک (TDS) باشد. البته بسته به نوع مساله و حساسیت منطقه پارامتر خاص می‌تواند تغییر کند.

با توجه به این‌که سرعت کامپیوترهای فعلی به طور قابل توجهی افزایش یافته است، حجم زیادی از اطلاعات در زمان کم پردازش می‌یابد. بنابراین کاهش ابعاد سلول‌ها درطراحی شبکه سطحی آبخوان به منظور افزایش دقت محاسبات تا حدودی امکان‌پذیر می‌باشد. ضمن این‌که استفاده کننده براساس حجم محاسبات و دقت مورد نظر ابعاد بهینه را تعیین می‌کند. با کوچک در نظر گرفتن ابعاد سلول‌ها یا شبکه سطحی آبخوان، تعداد آنها افزایش یافته و وارد کردن اطلاعات مورد نیاز هر سلول در مدل به صورت دستی، بسیار مشکل و وقت‌گیر می‌باشد. با این تفاصیل، به‌کارگیری فن سامانه اطلاعات جغرافیایی، به راحتی اطلاعات مورد نیاز هر سلول را به آن منتقل می‌کند. از طرف دیگر، بعضی از لایه‌های مورد نیاز مدل از تلفیق یا ترکیب چند لایه اطلاعاتی حاصل می‌شود که این کار به غیر از محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی امکان‌پذیر نیست.

سامانه انتخابی ممکن است، نرم‌افزار ILWIS و یا Arc-view و Arc-info و یا غیره باشد که قابلیت‌های بالایی را در مطالعات و تحقیقات آب و خاک دارد. اطلاعات اسکن شده به لحاظ این‌که همخوان باشند، باید به یک فرمت زمین مرجع[1] تبدیل شوند. به همین جهت هر یک از لایه‌های اطلاعاتی به صورت رقومی تبدیل و پس از کنترل و اصلاحات، به یک فایل قابل استفاده در مدل ریاضی مورد استفاده تبدیل می‌شود. ضمن این‌که بعضی از لایه‌های مورد نیاز به طور غیرمستقیم و از تلفیق اطلاعات مختلف به‌دست می‌آید.

برای مثال، لایه اطلاعاتی مربوط به هدایت هیدرولیکی، از تلفیق لایه ضریب قابلیت انتقال و عمق سطح آب و ضخامت لایه آبدار حاصل شد و یا توپوگرافی کف آبخوان که از تلفیق توپوگرافی سطحی و ضخامت لایه آبدار به‌دست آمد که تهیه این لایه‌ها خارج از محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی مشکل و با دقت پایین انجام می‌شود. به این ترتیب پس از این‌که شبکه سطحی آبخوان طراحی شد، لایه‌های اطلاعاتی به داخل مدل انتقال یافتند. نمودار شماره (۳-۱) مراحل انجام کار را نشان می‌دهد.

معمولا مدل‌هایی که در حال حاضر در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای خروجی‌های مناسبی نیستند. در حالی‌که با کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌توان نمایش اطلاعات ورودی و نتایج خروجی را به اندازه‌های مورد دلخواه و اشکال و رنگ‌های مختلف تهیه کرد. در این راستا، خروجی‌های مدل آب زیرزمینی آبخوان را می‌توان وارد محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی کرد و سپس با استفاده از کارتوگرافی آنها را نهایی و چاپ کرد.

1- Geo-Reference

۳-٤-۱۵- پارامترهای ورودی مدل

۳-٤-۱۵-۱- داده‌های مورد نیاز در مدل‌سازی کیفی آبخوان

به طور کلی دو نوع داده در فرآیند تهیه مدل ریاضی در آلودگی آب‌های زیرزمینی مورد نیاز است:

الف: داده‌هایی که شرایط هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمی منطقه را مشخص می‌کند. این نوع داده‌ها، قاعدتا در فرآیند مطالعات پایه که خود به عنوان پیش‌نیاز مدل‌سازی می‌باشد، باید تهیه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته باشد تا بتوان مدل کیفی را در منطقه تهیه کرد. به طور کلی داده‌های نوع اول به سه گروه تقسیم می‌شوند.

۱- داده‌هایی که به طبیعت زمین‌شناسی و سامانه درونی آبخوان بستگی دارد (مانند: موقعیت شرایط مرزی، ضخامت واحدهای زمین‌شناسی موقعیت طبیعی منبع آلاینده)

۲- پارامترهای فیزیکی و شیمیایی (مانند: هدایت هیدرولیکی، تخلخل و ضرایب تبادل شیمیایی)

۳- پارامترهایی که باعث تنش به آبخوان می‌شوند. (مانند: آلاینده‌های ورودی، توزیع مکانی و زمانی تخلیه و تغذیه آبخوان)

ب: نوع دوم اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی، داده‌های مشاهده‌ای هستند که به خصوص در مرحله واسنجی مدل مورد نیاز می‌باشند. این داده‌ها باید توسط سامانه شبکه و پیمایش در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شوند و در زمان تهیه مدل در دسترس باشند. این داده‌ها در مرحله تنظیم مدل به عنوان نقاط کنترل و یا نقاط شاهد با ارقام به‌دست آمده توسط مدل شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار می‌گیرند و براساس این مقایسه، مدل برای منطقه تطبیق داده می‌شود. از این داده‌ها می‌توان سطح آب آبخوان، غلظت آب زیرزمینی در چاه‌های نمونه‌برداری کیفی، میزان بده پمپاژ یا بده تزریق، زمان پیمایش ذره آب آلوده از منبع آلاینده تا محل مورد بررسی و... را نام برد.

علاوه بر این داده‌ها، در صورتی‌که برای منطقه خاص و کوچکی قرار است مدل تهیه شود، ممکن است نیاز به انجام یک‌سری عملیات صحرایی نیز باشد، مانند حفر چاه‌های اکتشافی، آزمایش پمپاژ، ایجاد شبکه متراکم چاه‌های مشاهده‌ای و چاه‌های نمونه‌برداری کیفی و عملیات ژئوفیزیک. آنچه که باید در مرحله ورود داده‌ها به مدل دقت شود، الف) کافی بودن داده‌ها و ب) دقت داده‌ها می‌باشد. علاوه بر آن همان طوری‌که قبلا بیان شد، در مدل‌های عددی پارامترهای ورودی باید در تمام شبکه‌ها و گره‌ها مشخص شوند تا بتوان محاسبات را انجام داد، بدیهی است که حتی سامانه متراکم پیمایش نیز نمی‌تواند جوابگوی داده‌های مورد نیاز در هر شبکه مدل باشد. به همین دلیل از روش‌های ریاضی و آماری میان‌یابی استفاده می‌شود. در این میان در سال‌های اخیر از روش‌های زمین آماری برای این منظور استفاده می‌شود. ضمن این‌که همان‌گونه که همیشه مورد تاکید است، مشورت با هیدروژئولوگ طرح می‌تواند در انتخاب نهایی و با دقت داده‌ها کمک شایان کند. قبل از توضیح راجع به روش‌های زمین آماری، ابتدا پارمترهای ورودی مدل مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳-٤-۱۵-۲- پارامترهای جریان

الف- هدایت هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی از مهم‌ترین پارامترهای شبیه‌سازی جریان و حمل مواد در آب‌های زیرزمینی می‌باشد. این پارامتر خصوصیات محیط متخلخل و همچنین جریان سیال را نشان می‌دهد. مقدار آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$K = \frac{\rho g}{\mu} k \qquad (۵۷-۳)$$

که در آن:

k : ضریب نفوذپذیری (L^2)

ρ : چگالی آب (ML^{-3})

g : شتاب ثقل (LT^{-2})

μ : ویسکوزیته دینامیک $ML^{-1}T^{-1}$

K : ضریب هدایت هیدرولیکی (LT^{-1}) می‌باشد.

دامنه تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی در سازندهای مختلف زمین‌شناسی و بافت‌های متفاوت خاک همان طوری‌که در جدول (۳-۱) ارائه شده، بسیار وسیع می‌باشد.

جدول ۳-۱- ضریب هدایت هیدرولیکی در سازندهای مختلف زمین‌شناسی [۳۴]

سازند	هدایت هیدرولیکی (متردرثانیه)
رسوبی	
قلوه‌سنگ	$۳*۱۰^{-۲} - ۳*۱۰^{-۴}$
شن درشت	$۹*۱۰^{-۳}-۶*۱۰^{-۷}$
شن ریز	$۹*۱۰^{-۴}-۶*۱۰^{-۷}$
شن متوسط	$۲*۱۰^{-۴}-۲*۱۰^{-۷}$
سیلت	$۱*۱۰^{-۵}-۲*۱۰^{-۹}$
شیل	$۱*۱۰^{-۶}-۲*۱۰^{-۱۲}$
رس	$۱*۱۰^{-۹}-۵*۱۰^{-۱۱}$
رس هوانزده	$۸*۱۰^{-۱۳}-۲*۱۰^{-۹}$
سنگ‌های رسوبی	
کارست	$۱*۱۰^{-۲}-۲*۱۰^{-۶}$
سنگ آهک, دولومیت	$۱*۱۰^{-۶}-۶*۱۰^{-۹}$
ماسه‌سنگ	$۳*۱۰^{-۶}-۶*۱۰^{-۱۰}$
سنگ سیلتی	$۱*۱۰^{-۸}-۱*۱۰^{-۱۱}$
نمک	$۱*۱۰^{-۱۰}-۱*۱۰^{-۱۲}$
آنهیدریت	$۴*۱۰^{-۸}-۲*۱۰^{-۱۳}$
شیل	$۱*۱۰^{-۹}-۲*۱۰^{-۱۳}$
سنگ‌های کریستالیزه شده	
بازالت نفوذپذیر	$۴*۱۰^{-۲}-۲*۱۰^{-۹}$
سنگ آذرین درز و شکافدار	$۸*۱۰^{-۴}-۳*۱۰^{-۹}$
گرانیت هوازده	$۳*۱۰^{-۵}-۵*۱۰^{-۶}$
گابرو هوازده	$۶*۱۰^{-۶}-۴*۱۰^{-۷}$
بازالت	$۲*۱۰^{-۶}-۴*۱۰^{-۱۱}$
سنگ‌های آذرین بدون درز و شکاف	$۳*۱۰^{-۱۰}-۲*۱۰^{-۱۴}$

همان‌طور که می‌دانیم این پارامتر از طریق انجام آزمایشات صحرایی مانند آزمایش پمپاژ، تست اسلگ[1] قابل محاسبه می‌باشد. ولی با توجه به ناهمگنی قریب به اتفاق سفره‌های آب زیرزمینی، ضریب هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده فقط معرف مقدار این

1- Slug test

ضریب در همان نقطه و شعاع تاثیر مربوط به آن نقطه، می‌تواند باشد و نمی‌توان آن‌را برای سایر نقاط منطقه مدل بسط داد. (در حالی‌که در مدل‌های عددی، داده‌های ورودی باید برای هر شبکه و گره مشخص باشد.)

برای برطرف کردن این مشکل، دو نگرش وجود دارد که براساس نقاط اندازه‌گیری شده می‌توان مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی را برای سایر شبکه‌ها محاسبه کرد.

۱- نگرش اول: استفاده از میانگین موثر داده‌های اندازه‌گیری شده و اعمال این میانگین به کلیه نقاط. در چنین مواردی به دلیل این‌که ضریب هدایت هیدرولیکی اغلب از توزیع احتمالاتی لوگ - نرمال تبعیت می‌کند، بهتر است از میانگین هندسی داده‌ها استفاده شود:

$$Y = \sqrt[N]{x_1 x_2 .....x_{N-1} x_N} \qquad (۵۸-۳)$$

و یا:

$$\ln(Y) = \frac{1}{N}\left[\ln(x_1) + \ln(x_2) + ...n(x_{N-1)} + \ln(x_N) \right] \qquad (۱-۵۸-۳)$$

که در آن x معرف ضریب هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده و y میانگین هندسی آن می‌باشد.

گرچه این روش می‌تواند، شبیه‌سازی عکس‌العمل متوسط سامانه آب‌های زیرزمینی را به خوبی انجام دهد ولی در مدل‌سازی کیفی آبخوان دچار مشکل می‌شود. به دلیل این‌که در پدیده انتقال مواد، عامل اصلی سرعت حرکت آب زیرزمینی است که خود، تابعی از ضریب هدایت هیدرولیکی می‌باشد. به همین جهت در نظر گرفتن حد متوسط این ضریب برای کلیه نقاط نمی‌تواند، صحیح باشد. ضمن این‌که جهت و مقدار حرکت مواد از یک منبع آلاینده به سایر نقاط بستگی به توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی محیط اطراف آن منبع دارد. اگرچه برای این‌که این روش تا حدودی اصلاح شود، می‌توان ابتدا منطقه را به چند زیر منطقه تقسیم و سپس مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی متوسط هر زیر منطقه را محاسبه و اعمال کرد. ولی با این وجود، با توجه به پیچیدگی فرایند جابه‌جایی مواد و پخشیدگی آن روش میانگین هندسی در توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی آبخوان در شبیه‌سازی کیفی آبخوان مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

۲- نگرش دوم: استفاده از روش‌های زمین آماری[1] برای میان‌یابی کردن مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی با توجه به نقاط اندازه‌گیری شده، معمولا سه روش زیر بین روش‌های مختلف زمین آمار کاربرد بیش‌تری دارد.

- روش کریجینگ

این روش یکی از رایج‌ترین روش‌های میان‌یابی می‌باشد که مهم‌ترین برآورد کننده خطی بدون انحراف (نا اریب) می‌باشد. این روش با استفاده از مقادیر معلوم و یک نیم تغییرنما[2]، مقادیر مجهول را برآورد می‌کند. نیم تغییرنما برای تشریح ارتباط مکانی مقدار یک متغیر در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه به‌کار می‌رود و همبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده را با توجه به فاصله و جهت آنها نشان می‌دهد. اختلاف کریجینگ با دیگر روش‌های میان‌یابی در واقع همین وجود نیم تغییرنما می‌باشد که می‌تواند

1- Geostatistic
2- Semi-Variogram

ساختار مکانی متغیر را در نظر بگیرد. ضمن این‌که خطای میان‌یابی نیز به صورت انحراف استاندارد مقادیر میان‌یابی شده تخمین زده می‌شود.

فرم دیگر استفاده از کریجینگ، لوگ کریجینگ است که به جای خود داده‌ها، از لگاریتم آنها استفاده می‌کند ولی فرآیند مدل میان‌یابی فرقی نمی‌کند.

میانگین متحرک وزنی[1]

در روش میانگین متحرک وزنی، مقدار یک متغیر در نقطه‌ای که نمونه‌برداری انجام نشده باشد، از روی نقاط مجاورش تخمین زده می‌شود. فرق این روش با کریجینگ در محاسبه وزن‌هایی است که به مقادیر مشاهده شده نسبت داده می‌شود. در روش میانگین وزنی، وزن‌ها باتوجه به فاصله هر نقطه معلوم نسبت به نقطه مجهول و بدون توجه به موقعیت و نحوه پراکندگی نقط حول نقطه تخمین تعیین می‌شوند. بدین ترتیب که به نقاط نزدیک‌تر، وزن بیش‌تری اختصاص داده می‌شود و نقاط هم فاصله، وزن یکسانی را دریافت می‌کنند. به عبارت دیگر نقاط با فاصله کم‌تر، اثر بیش‌تری در تخمین می‌گزارند.

TPSS –

فرق این روش با کریجینگ، در این است که در روش کریجینگ نیاز به نیم تغییرنما بود ولی در روش TPSS نیاز به برآورد یک پارامتر پیرایش[2] دارد که بتواند بهترین توازن را بین داده‌های واقعی و هموار شدگی تابع اسپلاین برازش داده شده، برقرار کند.

در حال حاضر نرم‌افزارهای گوناگونی در زمین‌آمار وجود دارد که به سهولت می‌توان توزیع مکانی پارامترها را به‌دست آورد. مانند GEOPACK، INTERP، GEO-EAS، Gs+. در حال حاضر بخشی از سامانه اطلاعات جغرافیایی به روش‌های مختلف میان‌یابی مجهز شده‌اند که می‌توان از آنها نیز استفاده کرد.

آنچه به این مبحث می‌توان اضافه کرد، به خصوص در توزیع مکانی پارامتر مهم و بنیادی مدل‌های ریاضی در آب‌های زیرزمینی (ضریب هدایت هیدرولیکی)، این است که گرچه با ابزارهای مختلف و تحت سامانه Windows، انجام عمل میان‌یابی ساده به نظر می‌آیند ولی ناهمگنی محیط، منبع و نوع آلاینده، عواملی هستند که در مرحله انتخاب نهایی خروجی چنین داده‌هایی که با استفاده از این‌گونه نرم‌افزارها حاصل می‌شوند با نهایت دقت انجام شود و به خصوص با افراد کارشناس و خبره آب‌های زیرزمینی که سال‌ها در منطقه فعالیت می‌کنند، در قبول یا رد نتایج مدل‌های ژئواستاتیستیک مشورت شود.

ب- ضریب ذخیره و آبدهی ویژه

در مدل‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی، در رژیم غیرماندگار در سفره‌های تحت فشار، ضریب ذخیره و در سفره‌های آزاد آبدهی ویژه مورد نیاز می‌باشد. این ضرایب با توجه به سازندهای مختلف و رفتارهای سفره متناوت است که در جدول (۳-۲) ارائه می‌شود.

1- Weighted moving average
2- Smoothing splines

جدول -۳-۲- مقادیر درصد آبدهی ویژه در سازندهای مختلف زمین‌شناسی [۳٤]

مواد	درصد آبدهی ویژه
قلوه سنگ درشت	۲۳
قلوه سنگ متوسط	۲۴
قلوه سنگ ریز	۲۵
شن درشت	۲۷
شن متوسط	۲۸
شن ریز	۲۳
سیلت	۸
رس	۳
ماسه سنگ ریزدانه	۲۱
ماسه سنگ متوسط دانه	۲۷
سنگ آهک	۱۴
ماسه بادی	۳۸
لوس	۱۸
بیت	۴۴
شیست	۲۶
سنگ سیلتی	۱۲
سیلت پردومینالتی	۶
شن پردومینالتی	۱۶
قلوه سنگ پردومینالتی	۱۶
توف	۲۱

ج- پارامترهای حمل مواد

- تخلخل

همان طوری‌که در فصل دوم و معادلات پایه آلودگی آب‌های زیرزمینی مشاهده شد، تخلخل یکی از پارامترهای مهم در حمل مواد می‌باشد. این پارامتر به دو طریق محاسبات شبیه‌سازی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. الف) تاثیر بر سرعت نشت که می‌تواند جابه‌جایی حمل مواد را کنترل کند. ب) حجم فضای خالی در یک گره سلول را برای ذخیره مواد محلول نشان می‌دهد. مقدار این پارامتر با توجه به سازندهای مختلف طبق جدول (۳-۳) ارائه می‌شود.

جدول-۳-۳- مقادیر درصد تخلخل در سازندهای مختلف زمین‌شناسی [۳٤]

سازند	درصد تخلخل
رسوبی	
قلوه سنگ درشت	۲۴-۳۶ ۲۵-۳۸ ۳۱-۴۶ ۲۶-۵۳ ۳۷۴-۶۱
قلوه سنگ ریز	۲۵-۳۸
شن درشت	۳۱-۴۶
شن ریز	۲۶-۵۳
سیلت	۳۴-۶۱
رس	۳۴-۶۰
سنگ‌های رسوبی	
ماسه سنگ	۵-۳۰
سنگ سیلتی	۲۱-۴۱
سنگ آهک	۰-۲۰
سنگ آهک کارستی	۵-۵۰
شیل	۰-۱۰
سنگ‌های کریستالیزه	
سنگ‌های کریستالیزه درز و شکافدار	۰-۱۰
سنگ‌های کریستالیزه متراکم	۰-۵
بازالت	۳-۳۵
گرانیت هوازده	۳۴-۵۷
گابرو هوازده	۴۲-۴۵

- پخشیدگی

پخشیدگی در مدل‌های ریاضی در آلودگی آب‌های زیرزمینی یکی از پارامترهای موثر در نتایج خروجی مدل می‌باشد. این پارامتر همانند پارامتر قابلیت انتقال سفره (T)، در واقع قابلیت پخشیدگی مواد محلول در سفره را نشان می‌دهد. از آن‌جایی‌که پخشیدگی در جهات مختلف به‌وقوع می‌پیوندد، لذا برآورد این پارامتر در جهات طولی و عرضی (پخشیدگی عرضی در جهات افقی و عمودی)، در مراکز تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته و می‌گیرد. رابطه پخشیدگی طولی وعرضی به صورت زیر می‌باشد:

$$DL = \alpha L v \quad \text{پخشیدگی طولی } (L^2T^{-1})$$
$$DT = \alpha T v \quad \text{پخشیدگی عرضی } (L^2T^{-1}) \qquad (۵۹-۳)$$

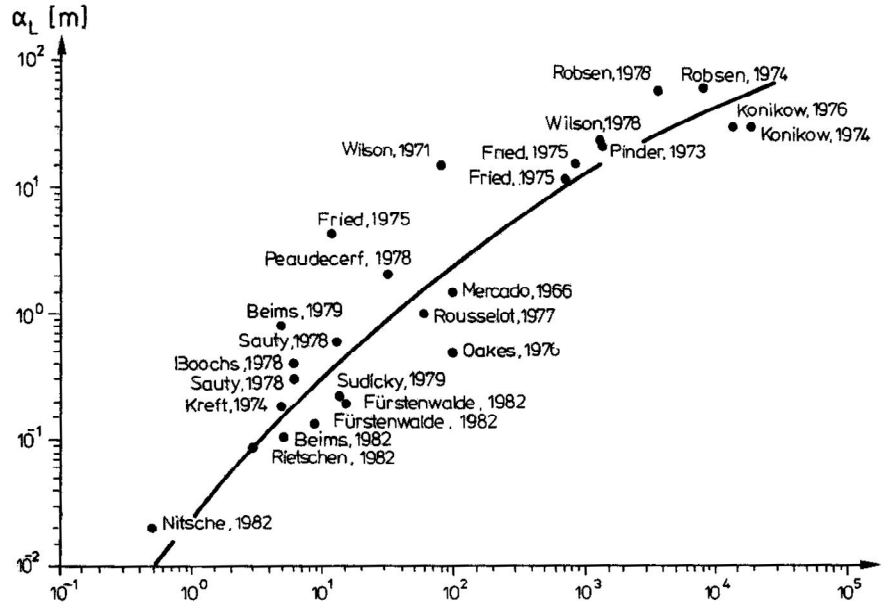
با توجه به این‌که مقدار سرعت حرکت آب (v) یکی از نتایج خروجی مدل کمی آب‌های زیرزمینی می‌باشد، لذا مجهول معادلات فوق فقط αL و αT می‌باشد که باید در مرحله راه‌اندازی مدل کیفی، به عنوان پارامترهای ورودی از قبل تعیین شده و به مدل داده شود.

نتایج تحقیقات در سه محیط آزمایشگاهی، سایت تحقیقاتی و حالت واقعی سفره آب زیرزمینی، نشان می‌دهد که مقدار عددی این پارامتر شدیدا تحت تاثیر مقیاس کار می‌باشد. مقیاس در این‌جا حد فاصل بین منبع آلاینده تا نقطه کنترل (به طور مثال چاه

نمونه‌برداری کیفی) است. از طرف دیگر به دلیل این‌که اندازه‌گیری مقدار ضرایب پخشیدگی αL و αT، به سادگی امکان‌پذیر نیست و لازمه آن انجام عملیات ردیابی می‌باشد، لذا در مدل‌سازی کیفی آبخوان می‌توان این ضرایب را از نتایج تحقیقات گذشته انتخاب کرد و سپس در حین واسنجی مدل مقادیر آن را تصحیح نمود. ضمن این‌که معمولا پارامتر ضریب پخشیدگی طولی (αL) مورد بررسی قرار می‌گیرد و با توجه به رابطه بین پخشیدگی طولی و عرضی، مقدار ضریب پخشیدگی عرضی تعیین می‌شود.

به دلیل تاثیر مستقیم مقیاس و همچنین اثرات بافت و مواد تشکیل‌دهنده محیط مورد آزمایش و همچنین نوع آلاینده برروی مقادیر این ضرایب دامنه تغییرات آن بسیار وسیع و گسترده می‌باشد. به طور مثال, ضریب پخشیدگی طولی از ۰/۰۱ تا ۵۰۰ متر گزارش شده است. معمولا در مقیاس آزمایشگاهی ضریب پخش دبی طولی بین ۰/۰۱ تا ۱ سانتیمتر و در مقیاس صحرایی بین ۰/۱ تا ۲ متر درنظر گرفته می‌شود [۳۴]. نسبت بین ضریب پخشیدگی عرضی به ضریب پخشیدگی طولی معمولا بین ۰/۱ تا ۰/۵ و در اکثر مواقع ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود.

همان طوری‌که دامنه وسیع تغییرات این پارامتر نشان می‌دهد، در تعیین اولیه مقدار ضریب پخشیدگی طولی باید دقت کافی کرد. ضمن این‌که بر خلاف سایر پارامتر در مدل آب زیرزمینی، به سهولت نمی‌توان جدولی از مقادیر عددی این ضرایب باتوجه به بافت‌های مختلف ارائه کرد. البته در بعضی مواقع, جداولی توسط سازمان‌های تحقیقاتی دنیا برای ضرایب پخشیدگی ارائه شده است که استفاده از آن باید با دقت انجام شود. ولی می‌توان از منحنی‌های روابطی که بین طول محدوده مطالعه و ضریب پخشیدگی طولی توسط محققین مختلف به‌دست آمده است، (به طور مثال نمودار ۳-۱) استفاده و در مرحله کالیبراسیون مقدار آن را تدقیق کرد.



نمودار ۳-۱- رابطه بین مقیاس و ضریب پخشیدگی طولی [۱۷]

به طور مثال فرض کنیم که مقیاس کار در منطقه‌ای که می‌خواهیم مدل کیفی آن را تهیه کنیم، ۱۰۰ متر باشد (یعنی فاصله منبع آلاینده تا نقطه کنترل، چاه نمونه‌برداری). در این صورت با توجه به نمودار ۳-۱، مقدار ضریب پخشیدگی طولی برابر با ۱ متر می‌باشد. دقت شود در جایی که منبع مشخص آلاینده‌ای وجود ندارد و فقط مدل کیفی سفره آب زیرزمینی تهیه می‌شود و به طور مثال TDS یا EC و غیره بررسی می‌شود، در این صورت با توجه به این‌که ضریب پخشیدگی طولی معرف پخشیدگی در جهت خط

جریان می‌باشد، لذا می‌توان طول شبکه مدل را به عنوان مقیاس کار در نظر گرفت. به طور مثال اگر طول شبکه ۲۵۰ متر باشد, در این صورت ضریب پخشیدگی طولی برابر حدود ۴ متر خواهد شد.

د- پارامترهای شیمیایی

در زمینه پارامترهای شیمیایی پخشیدگی جذب مواد براساس نوع ماده آلاینده، تحقیقات انجام شده در دنیا اندک می‌باشد. به خصوص برای انتقال نتایج آن به کارهای واقعی و در شرایط سفره آب زیرزمینی، هنوز نتایج تحقیقات به صورت مشترک ارائه نشده است. در صورتی‌که پساب کارخانجات صنعتی و یا معادن و فاضلاب شهری به طور مستقیم و یا غیرمستقیم (از طریق ایجاد حوضچه‌ها)، به سفره آب زیرزمینی منتقل شود طبعا براساس نوع ماده، واکنش شیمیایی و پدیده‌های جذب و فروپاشی متفاوت خواهد بود. بنابراین به سهولت نمی‌توان با ارائه یک جدول، مقادیر پارامترهای مورد نیاز حل معادلات را (در بخش واکنش شیمیایی) به‌دست آورد و به مدل داد. با این وجود در این‌جا جدولی از مقادیر تجربی پارامتر Kd (پارامتر جذب خطی در واکنش شیمیایی) در بعضی از عناصر و سازندهای زمین‌شناسی در جدول (۳-۴) ارائه می‌شود.

جدول-۳-٤- مقادیر K_d(ml/g) براساس تجارب حاصل در بعضی از تحقیقات [٣٤]

عنصر	نمک	بازالت	توف	گرانیت
Tc	۲[a]	۲۰[b].۰	۱۰[b].۰	۴[a]
Pu	۵۰۰[b].۵۰	۲۰۰[b].۱۰۰	۵۰۰[b].۴۰	۵۰۰[b].۱۰۰
Np	۳۰[b].۷	۵۰[b].۳	۵۰[b].۳	۵۰[b].۱
I	۰	۰	۰	۰
U	۱[a]	۶[a]	۴[a]	۴[a]
Cs	۱[c].۸۰۰	۳۰۰	۱۰۰	۳۰۰
Ra	۵	۵۰	۲۰۰	۵۰
Sr	۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۲
C	۰	۰	۰	۰
Am	۳۰۰	۵۰	۵۰	۲۰۰
Sn	۱[b].۵۰	۱۰[b].۱۰۰	۵۰[b].۵۰۰	۱۰[b].۵۰۰
Ni	۶	۵۰	۵۰	۱۰
Se	۲۰[b].۲۰	۲۰[b].۵	۲	۲
Cm	۲۰[b].۱۰۰[b]	۵۰	۵۰	۲۰۰
Zr	۳۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
Sm	۵۰۰	۵۰	۵۰	۱۰۰
Pd	۵۰	۵۰	۵۰	۱۰
Th	۳	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
Nb	۵۰[c].۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
Eu	۵۰	۵۰	۵۰	۱۰۰
Pa	۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
Pb	۲	۲۵	۲۵	۵
Mo	۰/۵[b].۱	۱۰[b].۴	۱۰[b].۴	۵[b].۱

a : تفاوت معنی‌داری بین مقادیر اندازه‌گیری شده در اکسیداسیون و احیا E_H وجود ندارد

b : شرایط احیا، مقدار دوم برای شرایط اکسیداسیون

c : مقدار اول برای تپه‌های نمکی مقدار دوم برای سنگ کف نمک

در صورت نیاز می‌توان به گزارشاتی در این زمینه که براساس تحقیقات انجام شده براساس سفارش خصوصی تهیه شده‌اند مراجعه کرد، بدیهی است که چنین گزارشاتی کم‌تر در دسترس عموم قرار دارند.

در این میان گزارشات مربوط به تحقیقات در زمینه آلاینده‌های کشاورزی بیش‌تر در دسترس قرار دارند. در صورتی‌که نتایج تحقیقات آلاینده‌های رادیواکتیو معمولا به‌هیچ‌وجه در دسترس عموم قرار نمی‌گیرد.

۳-۵- واسنجی مدل کیفی آب‌های زیرزمینی و تحلیل حساسیت

همان طوری‌که در فصول گذشته ذکر شد، با در نظر گرفتن مدل مفهومی آبخوان، تعیین روش حل معادلات، انتخاب نرم افزار مناسب و ورود داده‌ها، مدل راه اندازی می‌شود که اگر معادله پایه جریان آب زیرزمینی را در نظر بگیریم.

$$R\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}(v_i C)+\frac{q_s}{\theta}Cs-\lambda\left(C+\frac{\rho_b}{\theta}\overline{C}\right) \qquad (۶۰-۳)$$

که در آن:

C = غلظت مواد محلول در آب زیرزمینی (ML^{-3})

t = زمان (T)

x_i = جهات مختلف x و y و z در سامانه مختصات کارتزینی (L)

D_{ij} = ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی (L^2T^{-1})

v_i = سرعت حرکت آب (LT^{-1})

q_s = بده ورودی و خروجی در واحد حجم، (ورودی، مثبت وخروجی، منفی) (LT^{-1})

C_s = غلظت ورودی‌ها و خروجی‌ها (ML^{-3})

θ = تخلخل (بدون بعد)

ρ_b = چگالی خاکدانه‌ها (ML^{-3})

$\overline{C}$ = غلظت مواد جذب شده در محیط متخلخل (MM^{-1})

λ = عدد ثابت واکنش شیمیایی T^{-1}

R = فاکتور تاخیر

در حل پیش‌رو، مقدار غلظت آب آبخوان در واقع خروجی سامانه معادلات است. می‌توان بیان داشت که در قریب به اتفاق حالات مدل‌سازی و به ویژه در مراحل اولیه اجرای مدل، مقدار غلظت آب محاسبه شده با غلظت مشاهده شده در نقاط کنترل، که همان چاه‌های نمونه‌برداری کیفی باشند، به دلایل زیر با هم مطابقت ندارند:

- عدم شناخت کافی ضرایب هیدرودینامیکی در مدل کمی و پخشیدگی در مدل کیفی
- عدم دقت در داده‌های ورودی تغذیه و تخلیه به سامانه
- عدم شناخت دقیق منابع آلاینده در سطح آبخوان

- عدم تعریف مناسب شرایط مرزی و اولیه

از طرف دیگر به منظور این‌که بتوان از مدل در جهت مدیریت کمی و کیفی بهره‌برداری از آبخوان استفاده کرد، باید پارامترهای مدل را به منطقه مورد نظر تطبیق داد. به این معنی که مقادیر ضرایبی را که از آنها مطمئن نیستیم، آن‌قدر تغییر داد تا اختلاف مقادیر غلظت محاسبه شده و مشاهده شده در حد قابل قبولی برسد.

این فرآیند را تنظیم، تطبیق و یا واسنجی مدل می‌نامند. بدون شک یکی از حساس‌ترین مراحل مدل‌سازی، مرحله واسنجی است. به عبارت دیگر کلید مدل‌سازی را می‌توان همین مرحله دانست. به طورکلی پارامترهایی که در مدل، لازم به تصحیح دارند، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان (ضریب هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره) و مقادیر عددی تغذیه و تخلیه طبیعی از آبخوان، ضرایب پخشیدگی و شیمیایی می‌باشند.

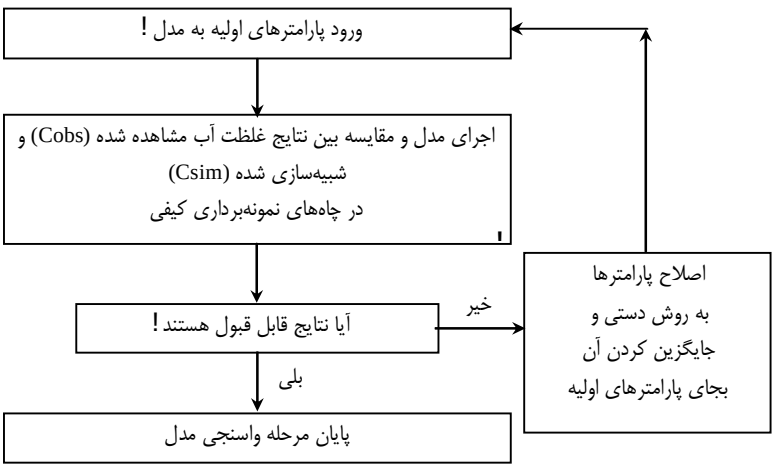
به طور کلی دو نگرش در واسنجی مدل آب زیرزمینی وجود دارد:

الف – روش‌های دستی مبتنی بر سعی و خطا[1]

ب – روش‌های خودکار مبتنی بر بهینه‌سازی[2]

۳-۵-۱- روش سعی و خطا

روش سعی و خطا در واسنجی مدل آب زیرزمینی، یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال موثرترین روش‌ها می‌باشد. در این روش مقادیر پارامترهای مدل در ابتدا به عنوان ورودی به مدل داده می‌شود و پس از اجرای مدل، بین مقادیر غلظت مشاهده شده و محاسبه شده، مقایسه‌ای انجام می‌شود. در صورتی‌که تفاوت قابل ملاحظه بین این دو وجود داشته باشد، پارامترها با دید کارشناسی تصحیح شده و مجددا به مدل داده و مدل اجرا می‌شود. این کار آن‌قدر تکرار می‌شود تا این‌که تکرار این کار تا حد رسیدن به نتایج قابل قبول ادامه خواهد داشت.نمودار (۳-۲)، الگوریتم روش را به طور خلاصه نشان می‌دهد.



نمودار ۳-۲- مراحل واسنجی مدل به روش دستی

1- Manual calibration- trial and error
2- Automatic calibration

به طور کلی روش سعی و خطا معایب و مزایایی دارد که مهم‌ترین آن به صورت زیر است:

- نیاز به نوشتن یک برنامه کامپیوتری جدید برای واسنجی ندارد و با همان برنامه اصلی مدل شبیه‌سازی می‌توان واسنجی را انجام داد.
- حتی در مواقعی که هیچ شناختی از سامانه وجود ندارد می‌توان با پارامترهای فرضی از مدل آن استفاده کرد. (بدیهی است که در این‌صورت مرحله واسنجی فوق‌العاده طولانی‌تر خواهد شد).
- در موقع تغییر پارامترها، ممکن است مجبور باشیم که چند تا از پارامترها را تصحیح کنیم که در این‌صورت قضاوت کارشناسی می‌تواند در انتخاب مقادیر اصلاحی پارامترها موثر واقع شود.
- با وجود این مزایا، روش سعی و خطا بسیار وقت‌گیر می‌باشد. به خصوص زمانی که پارامترها وابستگی زیادی نسبت به هم داشته باشند و از طرف دیگر چون بهینه‌سازی در یافتن مقدار ضرایب و پارامترهای مدل انجام نمی‌شود، بنابراین ممکن است در مرحله واسنجی، نتایج حاصله لزوما بهترین نتیجه نباشند. با توجه به محدودیت‌های این روش، در سال‌های اخیر در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، از روش خودکار نیز استفاده می‌کنند.

۳-۵-۲- روش خودکار واسنجی

در واقع برای واسنجی مدل، از روش معکوس حل معادلات دیفرانسیل جزیی استفاده می‌شود. به این ترتیب که با توجه به این‌که در اکثر مناطق و دشت‌ها، آمار و اطلاعات غلظت چاه‌های نمونه‌برداری کیفی معادله است. لذا در معادله (۵-۱)، در حل معکوس، مقادیر غلظت آب و به عنوان ورودی داده می‌شود و مقدار ضرایب معادله هیدرودینامیکی آبخوان، پخشیدگی و بیلان تغذیه و تخلیه به عنوان خروجی مدل خوانده می‌شود. سپس نتایج حاصله از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از مشاهدات مقایسه می‌شود، تا جایی‌که کم‌ترین اختلاف را با هم داشته باشند.

مساله معکوس، با وجود این‌که مرحله واسنجی مدل را ساده تر و سریع‌تر می‌کند ولی محدودیت‌هایی در تئوری این روش باعث شده است که در فرآیند مدل‌سازی، استفاده از آن محدود باشد.

قبل از این‌که به محدودیت‌های روش حل معکوس اشاره شود، متذکر می‌شود که به طور کلی حل پیش‌رو معادلات دیفرانسیل جزیی آب‌های زیرزمینی از نظر ریاضیات حالت مشخص و معادله Well Posedness دارد، در واقع شرایط زیر بر آن حاکم می‌باشد:

- وجود جواب
- یکتایی جواب
- پایداری

به طور ساده‌تر می‌توان بیان کرد که در حل پیش‌رو مسیر حل مشخص است و در نتیجه مساله به جواب خواهد رسید و بیش از یک جواب نیز نخواهد داشت، ضمن این‌که جواب‌ها نیز پایدار هستند. در صورتی‌که حل معکوس از نظر ریاضیات مبهم و ناشناخته است. به این معنی که ممکن است هرگز به جواب منطقی و قابل قبولی از نظر فیزیکی منجر نشود و یا اینکه تعداد زیادی جواب داشته باشد. (مثلا تعداد زیادی جواب در پارامترهای هیدرودینامیکی پخشیدگی آبخوان).

با توجه به این نقص‌ها، استفاده از روش خودکار برای واسنجی مدل‌های ریاضی در آب‌های زیرزمینی، بسیار محتاطانه صورت می‌گیرد. به خصوص در مدل‌های کیفی و باتوجه به تعدد پارامترها باید دراستفاده از این روش بسیار دقت کرد.

به طورکلی تطبیق مدل کیفی در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول به منظور تصحیح کلیه پارامترهای آبخوان، رژیم جریان ماندگار فرض می‌شود و در حالت دوم، تنظیم در رژیم غیرماندگار، انجام می‌شود. در مرحله واسنجی مدل کیفی پارامترهای مدل کمی نیز باید مجددا تنظیم شوند و به این‌صورت که با توجه به این‌که حرکت آلودگی در آبخوان ناشی از حرکت آب زیرزمینی و همچنین سرعت پخشیدگی املاح به سرعت حرکت جریان آب در آبخوان بستگی دارد، لذا هربار با تغییراتی در مدل کمی، مقدار سرعت حرکت آب اصلاح شده و سرعت‌های جدید به مدل کیفی وارد می‌شود و پس از اجرای مدل نتایج به صورت متغیر وابسته با همان غلظت، ظاهر می‌شوند. درصورتی‌که تفاوت محاسبه شده و مشاهده شده غلظت معنی‌دار باشد، این فرآیند مجددا تکرار می‌شود تا این‌که اختلاف به یک مقدار قابل قبولی برسد. ضمن این‌که این اختلاف تابع اهداف پروژه و شرایط طبیعی حاکم بر آبخوان می‌باشد.

به طور کلی فرآیند تنظیم مدل کیفی و ارزیابی واسنجی با استفاده از روش‌های عددی (منظور روش‌هایی که در آن مقدار و عدد مطرح است) براساس ۵ روش زیر انجام می‌شود:

۱- میانگین اختلاف بین غلظت مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل

۲- واریانس اختلاف بین غلظت مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل

۳- میانگین اختلاف مطلق بین غلظت مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل

۴- جذر میانگین مربعات اختلاف بین غلظت مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل

۵- همبستگی بین غلظت مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل

در انتهای مرحله واسنجی آزمون‌های فوق و نتایج گرافیکی آن می‌تواند، ارائه شود.

علاوه بر ارزیابی عددی واسنجی، واسنجی توصیفی نیز نقش مهمی در مرحله تنظیم مدل‌های کیفی دارد. به این صورت که با شبیه‌سازی‌های مختلف، نتایج متفاوتی به‌دست می‌آید و پذیرش نتایج توسط گروه‌های زمین‌شناسی و مطالعات پایه کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی، اهمیت به سزایی دارد و گرچه این مرحله قضاوتی است، ولی با توجه به تجارب شخصی مدل‌ساز و همچنین شخص هیدروژئولوگ طرح و شرایط منطقه می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در قبول و یا رد نتایج واسنجی داشته باشد.

از مشکلات واسنجی مدل‌های کیفی، می‌توان عدم قابلیت اکثر مدل‌های حمل مواد در شبیه‌سازی را در فرآیند ماتریس پخشیدگی آلاینده‌ها ذکر کرد. به خصوص زمانی که بافت درونی آبخوان، از موادی با نفوذپذیری کم مانند سیلت و رس تشکیل شده باشد و حرکت مواد محلول در آب بسیار کند باشد. در اثر عدم تعیین دقیق ماتریس پخشیدگی، در نتیجه واسنجی آن نیز مشکل خواهد بود. مساله دیگر در واسنجی مدل‌های حمل مواد، محاسبه زمان پیمایش ماده آلوده از منبع آلاینده به سایر نقاط آبخوان می‌باشد که این مشکل به تشخیص دقیق منبع آلاینده باز می‌گردد که در اکثر حالات نمی‌توان آن را به طور دقیق تعیین کرد. مگر آلاینده به صورت یک چاه جذبی در محدوده یک آبخوان وسیع باشد.

در انتهای فرآیند واسنجی تست حساسیت انجام می‌شود. هدف از این مرحله، ارزیابی و یا اندازه‌گیری میزان تاثیر پارامترها برروی پارامتر غلظت می‌باشد. به عبارت دیگر با توجه به این‌که اکثر پارامترهای مدل اعم از پارامترهای هیدرودینامیکی، پراکنش و تغدیه و تخلیه، به خصوص در شبکه‌های طراحی شده مدل به طور صد درصد شناخته شده نیستند، لذا باید در این مرحله با تغییر در ارقام این

پارامترها حساسیت مدل را سنجید. به این منظور معمولا در صورتی‌که مرحله واسنجی به طور خودکار انجام شود از ضریب حساسیت استفاده می‌شود.

طبق توصیه راهنمای ASTM (P5981)، بهتر است به جای تعیین ضریب حساسیت، مقادیر حساسیت را با نمودار نمایش داد. به این‌صورت که ابتدا با تبادل‌نظر با هیدروژئولوگ طرح، محدوده منطقی مقادیر پارامترها را که می‌تواند در منطقه مطالعاتی وجود داشته باشد، تعیین می‌شود. سپس با تغییر ارقام یک پارامتر به ارزیابی نتایج حاصل از این تغییر برروی متغیر وابسته یعنی غلظت (در مدل‌های کیفی) و سطح آب آبخوان (در مدل‌های کمی) پرداخته می‌شود. در انتها با رسم نمودار و یا تهیه جداولی پارامترهای حساس مشخص می‌شوند، یعنی این پارامترها میزان حساسیت آنها به مسوولین اجرایی آب زیرزمینی منطقه کم‌تر می‌کند تا با پیاده کردن یک سامانه پیمایش کامل در منطقه به برآورد یا اندازه‌گیری دقیق پارامتر در نقاط مختلف آبخوان بپردازد و یا خود آن را جزو اولیت‌های کاری خود قرار دهند.

برای مرحله واسنجی که به عبارتی قلب مدل یک آبخوان می‌باشد، نمی‌توان زمان خاص و محدودی را در نظر گرفت. به دلیل این‌که تعجیل در اتمام این مرحله و هرگونه توجیهی در زود به جواب رسیدن، ممکن است باعث به‌دست آوردن نتایج غیرواقعی و ناصحیح شود.

از طرف دیگر نکته کلیدی و حساس در مرحله تنظیم و تطبیق مدل، همکاری بین گروه مطالعات پایه کیفی آب‌های زیرزمینی یک منطقه خاص و گروه مدل‌سازی می‌باشد. این همکاری در پذیرش نهایی جواب‌های حاصل از مدل نقش اساسی دارد و بدون مشاورت و تبادل نظر این دو گروه، تنظیم مدل و واسنجی مدل میسر نخواهد شد.

۳-۵-۳- صحت‌سنجی مدل

پس از انجام مرحله تنظیم و تطبیق مدل برای شرایط خاص منطقه لازم است، مدل برای چند سال بعد از سال بیلان مدل کنترل شود و صحت و دقت آن مورد ارزیابی قرار گیرد. در این صورت لازم است بیلان آب زیرزمینی برای تهیه مدل کمی و بیلان کیفی آب زیرزمینی برای تهیه مدل کیفی آبخوان برای سال‌های بعد وجود داشته باشد و یا از هیدروژئولوگ طرح خواسته شود. (به طور مثال مدل برای سال ۸۱-۱۳۸۰ تهیه شده و باید برای سال‌های ۸۲-۸۱ ۸۳-۸۲ و ۸۴-۸۳ نیز اجرا و کنترل شود. در صورتی که نتایج مدل با آنچه در واقعیت رخ داده است، مطابقت داشته باشد این مدل آماده استفاده در بخش مدیریت آبخوان می‌باشد.

۳-۶- کاربرد مدل کیفی در مدیریت آبخوان

همان طوری‌که یکی از اهداف مدل‌سازی کمی و کیفی آبخوان می‌باشد، استفاده از مدل جهت مدیریت بهتر آبخوان است. نحوه اعمال مدیریت با توجه به نوع آلاینده‌ها، توزیعی و یا موضعی بودن آلودگی، روند آلایندگی نسبت به زمان و جبهه پیش‌روی آلودگی متفاوت می‌باشد. از طرف دیگر حفاظت از چاه‌های بهره‌برداری به طور عام و یا تعدادی از چاه‌های تامین آب شرب، به طور خاص نیز می‌تواند جزو اهداف مدل کیفی باشد. ضمن این‌که رفع آلودگی طراحی شبکه چاه‌های نمونه‌برداری کیفی، نیز می‌تواند با استفاده از نتایج مدل کیفی صورت گیرد و راهکارهایی را برای اجرا ارائه کند. از طرف دیگر برای این‌که یک مدل کیفی بتواند در بخش‌های مختلف مدیریتی مفید واقع شود، باید از نقطه نظرات مختلف ارزیابی شود. به طور مثال در گام اول وجود داده‌های غلظت در چاه‌های نمونه‌برداری ترجیحا ماهانه و یا فصلی یا حداقل در هر سال دو بار (فصل تر و فصل خشک) در طی یک دوره چند ساله ضروری

می‌باشد. با وجود این داده‌ها و همچنین سایر داده‌های مورد نیاز مدل کیفی و بیلان آن زیرزمینی در سال‌های مختلف می‌توان با اعمال برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، در سری‌های زمانی مختلف روند آلوده شدن آبخوان را مشاهده کرد و در نتیجه جهت حفاظت از آن تصمیم‌گیری‌های لازم را انجام داد.

از طرف دیگر، عکس‌العمل انجام پروژه‌های آبرسانی و تامین آب شرب و یا انتقال آب از یک منطقه به منطقه‌ای دیگر، اجرای شبکه‌های فاضلاب شهری و غیره می‌تواند با استفاده از مدل انجام شود. در این‌حالت می‌توان گزینه‌های مختلف را طراحی کرده و به مدل داد و نتایج آن را بررسی کرد.

در صورتی‌که آبخوان مشکل آلودگی داشته باشد ولی پارامترهای مورد نیاز مدل کیفی در دسترس نباشد، می‌توان از مدل ریاضی کمی استفاده کرد. به این صورت که در این‌جا، سرعت حرکت آب در آبخوان مورد نظر باشد و به عبارت دیگر با ارزیابی گرادیان هیدرولیکی و سرعت آب زیرزمینی، می‌توان به نحوی پیش‌روی آلاینده را پیگیری کرده و تصمیمات لازم را اتخاذ کرد.

از طرف دیگر داشتن حداقل ۳ سال آمار برای تهیه مدل کیفی آبخوان یکی از شرایط لازم می‌باشد که می‌تواند در مرحله واسنجی و همچنین مرحله صحت‌سنجی (پس از تهیه مدل، اجرای آن برای سال‌های بعد) مورد استفاده قرار گیرد. با این‌که در اکثر مواقع به خصوص در آبخوان‌های کشور آمار کیفیت آبخوان بسیار پراکنده و نامرتب است طوری‌که نمی‌توان نمونه‌های متوالی در ماه‌ها و یا سال‌های مختلف تهیه کرد. در چنین حالاتی، بدیهی است که اصولا تهیه مدل ریاضی آلودگی آبخوان مقدور نیست و چنان‌چه مدل‌سازی با تعداد اندک داده‌ها انجام شود، هرگز نمی‌تواند در بخش مدیریت آبخوان مفید واقع شود.

آنچه قابل ذکر است این است که بودن شرایط کافی تهیه مدل کیفی نمی‌توان از مدل جهت مدیریت بلندمدت آبخوان استفاده کرد. معمولا با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌های مختلف کمی و کیفی می‌توان وضعیت آبخوان را برای سال‌های بعد و حداکثر تا ۵ سال آینده پیش‌بینی کرد. به دلیل این‌که تغییر بهره‌برداری‌ها و اثرات آلاینده‌های مختلف با توجه به کاهش و یا افزایش حجم مخزن و تغذیه و تخلیه متغیر آبخوان در سال‌های دوردست قابل پیش‌بینی نبود و به همین دلیل استفاده از مدل کیفی برای مدیریت بلند مدت آبخوان به هیچ وجه توصیه نمی‌شود.

۳-۷- ارائه نتایج و گزارش نهایی مدل با ذکر یک مطالعه موردی

هدف از گزارش فنی مدل ارائه دستاوردهای مدل، روند مدل‌سازی، فرضیات در نظر گرفته شده و به خصوص ارائه اطلاعات به صورت جزیی می‌باشد. یک گزارش مدل، در مورد یک آبخوان، باید پاسخ‌گوی نیازهای کارفرما و کارشناسان آن باشد تا براساس آن بتوانند تصمیم‌گیری‌های لازم را در جهت مدیریت هر چه بهتر آبخوان اتخاذ نمایند.

بدیهی است به این منظور، نتایج مدل حتی‌الامکان می‌باید به صورت گرافیکی و جدول ارائه شود تا به‌سادگی بتوان به نتایج مدل دسترسی پیدا کرد.

در بخش پیشنهادات نیز توصیه می‌شود که از کلی‌گویی به شدت پرهیز شود. کلی‌گویی بدون تهیه مدل نیز امکان‌پذیر می‌باشد. لذا در بخش انتهایی گزارش باید نتایج دقیقا و بلافاصله پس از ذکر مجدد هر هدف ارائه شود تا به این ترتیب مسوول اجرایی و یا کارشناسان استفاده کننده از گزارش بتوانند اهداف خود را پیگیری کنند. بهتر است جزییات کار نیز ارائه شود به طور مثال در صورتی

که امکان بهره‌برداری از یک آبخوان وجود داشته باشد، ذکر شود که در چه مناطقی و چه شبکه‌هایی می‌توان بهره‌برداری از آبخوان را توسعه داد و یا برداشت از یک حد بیش‌تر، در چه شبکه‌هایی از مدل می‌تواند آبخوان را از نظر کیفی تحت تاثیر خود قرار دهد.

در بخش تنظیم مدل (واسنجی)، باید بسیار کامل و جز به تشریح فرآیند تطبیق پارامترهای آبخوان بپردازد. به این منظور در حد یک یا دو پاراگرف و حتی یک صفحه کافی نیست، بلکه باید علل ناهمخوانی ارقام محاسبه شده (توسط مدل) و مشاهده شده چه سطح آب، چه غلظت و چه پارامترهای هیدرودینامیکی، به تفصیل بیان شود و در صورت تاثیر عواملی چون گسل و یا عوامل ناشناخته طبیعی در مقادیر حاصل از مدل، این موضوع کاملا تشریح شود تا خواننده را از نظر مرحله تنظیم مدل، توجیه کند.

ترجیحا پس از مرحله واسنجی مدل و به‌خصوص در شرایطی که سامانه آب زیرزمینی دارای پیچیدگی‌های خاص باشد لزوما مدل باید پس از مرحله واسنجی و کالیبراسیون صحت‌سنجی شود. این کار همان‌طوری که در متن این دستورالعمل ذکر گردیده مستلزم این است که مدل را با داده‌های صحرایی واقعی و ترجیحا برای سه سال و یا حداقل برای یک سال با دوره زمانی ماهانه صحت‌سنجی کرد. بدیهی است پس از انجام مرحله صحت‌سنجی می‌توان از مدل با اطمینان بیش‌تری برای مدیریت آب‌های زیرزمینی منطقه استفاده کرد.

صداقت شخص مدل‌ساز نیز یکی از موارد کلیدی گزارش است که به خصوص در مرحله واسنجی و اجرای مدل در سناریوهای مختلف بهره‌برداری می‌تواند، بسیار موثر باشد. با علم به این‌که نتایج حاصل از مدل‌سازی و همچنین پیشنهادات ارائه شده در گزارش به عنوان دستور کار بخش‌های اجرایی به‌کار گرفته خواهد شد، لذا هر گونه اشتباه و یا عدم صداقت در فرآیند مدل‌سازی و یا نگارش گزارش می‌تواند خسارت جبران‌ناپذیری را به منابع آب زیرزمینی منطقه تحمیل کند.

از طرف دیگر، با توجه به اینکه مدل تهیه شده باید در اختیار سفارش دهندگان قرار گیرد تا بتوانند از آن در مدیریت آبخوان استفاده کنند لذا در اختیار گذاشتن آرشیو مدل به تیم کارشناسی کارفرما ضروری می‌باشد. این آرشیو باید حتی‌الامکان به صورت CD بوده و دارای موارد زیر باشد:

- فایل‌های ورودی و خروجی
- شبیه‌سازی‌های مختلف مدل در مراحل واسنجی
- نقشه‌ها
- متن کامل گزارش

در صورت امکان و توافق در ابتدای کار بین کارفرما و مشاور، دوره کوتاه مدت آموزشی (ترجیحا یک هفته) از طرف مشاور برای کارشناسان کارفرما در جهت آموزش مدل‌سازی و کاربرد آن برای آینده برگزار شود تا اهداف مدل‌سازی به خصوص برای سال‌های آینده و یا تغییر بیلان پیگیری شود.

گرچه تهیه گزارش و نحوه فصل‌بندی آن تابعی از شرح خدمات مطالعه موردی در منطقه خاص می‌باشد، با این وجود در زیر فهرست مطالب لازم و ضروری برای این‌که یک گزارش مدل کیفی آب‌های زیرزمینی در حد استاندارد باشد، ارائه شده است.

فصل اول: مقدمه و هدف از مدل‌سازی کیفی برای منطقه و میانی مدل‌سازی

در این مبحث ضمن ارائه مقدمه مدل‌سازی کیفی، ضرورت انجام این کار برای منطقه مورد مطالعه باید ذکر شود و مختصری راجع به کلیات مدل‌سازی کیفی آورده شود.

فصل دوم: مطالعات پایه آبخوان از نظر کمی‌و کیفی

به دلیل این‌که گزارش کیفی آبخوان باید به طور مستقل در یک جلد جداگانه ارائه شود، لذا در یک فصل لازم است خلاصه‌ای راجع به مطالعات پایه کمی و کیفی آبخوان ارائه شود تا خواننده دقیقا به مشکلات کیفی آبخوان آگاه شود، ضمن این‌که اطلاعات و داده‌های مورد نیاز مدل باید در این فصل بیان شود و نقشه‌های لازم ارائه شوند.

فصل سوم: مدل مفهومی و مدل ریاضی نمایش‌گر سامانه آبخوان

با توجه به این‌که گام اول در مدل‌سازی آبخوان تهیه مدل مفهومی می‌باشد، لذا در این فصل به تشریح چگونگی آن پرداخته می‌شود و سپس مدل ریاضی که نمایش‌گر سامانه آبخوان باشد، باید بازگو شود. به طور مثال مختصری از هر روش عددی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، (تفاضل‌های محدود، یا اجزای محدود و...)

فصل چهارم: انتخاب مدل عددی و نرم‌افزار مناسب برای آبخوان

در این فصل با توجه به این‌که مدلی باید تهیه شود، لذا یا مراحل توسعه مدل (اگر توسط مشاور انجام می‌شود) و یا علت انتخاب مدل عددی به کار گرفته شده در این منطقه ذکر شود تا کارشناس ذیربط دقیقا به علل این کار آگاهی پیدا کند.

فصل پنجم: ورود داده‌های کیفی آبخوان به مدل

این فصل یکی از مراحل مهم در مدل‌سازی است و راه‌اندازی مدل براساس آن انجام می‌شود. در این مرحله باید هر یک از مراحل ذیل ذکر شود و چگونگی اعمال آن به مدل توضیح داده شود. به طور اختصار می‌توان مواردی مانند شبکه‌بندی محدود مورد مطالعه، تعیین شرایط مرزی، تعیین شرایط اولیه و انتخاب گام‌های زمانی مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان و ضرایب پخشیدگی طولی و عرضی، مقادیر تغذیه و تخلیه و نوسانات سطح آب و همچنین غلظت آب آبخوان باید در این فصل مشخص شود.

فصل ششم: واسنجی (تنظیم، تطبیق) مدل کیفی تحلیل حساسیت و صحت‌سنجی

همان طوری‌که در متن راهنما در مورد این مرحله توضیح داده شده است یکی از حساس‌ترین مراحل فرایند مدل‌سازی واسنجی مدل است که به عبارت دیگر در این مرحله پارامترهای مدل باید برای منطقه مورد مطالعه، تنظیم و تطبیق داده شوند. این مرحله را بدون شک می‌توان قلب مدل دانست و هرگونه اشتباهی در این مورد می‌تواند منجر به نتایج کاملا نادرست در جهت اجرای مدل در مدیریت شود. لذا در این فصل باید این مرحله گام به گام چه از نظر تئوری و چه از نظر کاربرد آن برای منطقه مورد بحث مفصل قرار گیرد. پس از ارائه نتایج حاصل از واسنجی به صورت نقشه، نمودار و جدول به منظور ارزیابی حساسیت مدل برروی یک‌سری از پارامترهایی که تهیه و یا برآورد آن مشکل می‌باشد، تحلیل حساسیت مدل صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر هدف اصلی این بخش پیش‌بینی رفتار سامانه آبخوان در اثر تغییر پارامترها می‌باشد و در انتهای این مرحله می‌توان با آگاهی پارامتر حساس، مجددا یک کنترلی برروی داده‌های ورودی مدل و نتایج آن انجام داد تا مطمئن شد که ارقام پارامتر حساس به درستی وارد شده‌اند. از طرف دیگر در صورت عدم وجود این پارامتر حساس در نقاط مختلف محدوده مدل می‌توان به کارفرما پیشنهاد اندازه‌گیری این پارامتر را داد. همان‌طوری که قبلا ذکر گردید قبل از مرحله استفاده از مدل این مدل باید با داده‌های جدید صحت‌سنجی شود و پس از آن در مدیریت استفاده شود.

فصل هفتم: کاربرد مدل کیفی در مدیریت آبخوان منطقه

در این فصل با علم به این‌که کلیه تلاش‌ها صورت گرفته است تا مدل صحیحی برای منطقه تهیه شود. لذا می‌توان از این مدل جهت اعمال خواسته‌های مورد نیاز و اهداف مدل استفاده کرد. به طور مثال اگر هدف از مدل‌سازی پیش‌بینی روند آلودگی در سال‌های آینده و با مقدار بهره‌برداری وضع موجود باشد، می‌توان نتایج را برای سال‌های آینده ارائه داد. اگر قرار است، سد مخزنی یا کارخانه‌ای در سال‌های آینده تاسیس شود، انتقال آب از یک حوضه به حوضه دیگر صورت گیرد و یا شبکه فاضلاب شهری و روستایی ایجاد شود، این تغییر و تحول را می‌توان با اجراهای مکرر مدل ارزیابی کرد و نتایج را ارائه داد تا کارفرما و استفاده کنندگان مدل براساس آن تصمیم‌گیری‌های مقتضی را اعمال کنند.

۳-۷-۱- بررسی یک نمونه مطالعه موردی

در این مبحث یک نمونه مدل گزارش کیفی آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد و چگونگی انجام آن طبق دستورالعمل تهیه شده گام به گام پیگیری می‌شود.

بررسی گزارش مدل ریاضی کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت‌های حوضه رودخانه‌های تالار بابل و هراز:

- با توجه به این‌که اولین گام پس از مطالعات پایه کمی و کیفی آب زیرزمینی تهیه مدل مفهومی می‌باشد در این گزارش این مدل که اساس تهیه معادلات پایه و مدل ریاضی می‌باشد، وجود ندارد که این یکی از نقص‌های اساسی این گزارش می‌باشد.
- مدل مفهومی‌که خروجی مطالعات پایه است، خود به عنوان نمایش‌گر آنچه در آبخوان می‌گذرد، می‌باشد. در این مورد به طور مفصل در دستورالعمل تهیه مدل کیفی توزیع داده شده است. در مورد مدل ریاضی کیفی دو مدل مفهومی مورد نیاز است. مدل مفهومی کمی برای تهیه مدل ریاضی کمی و مدل مفهومی کیفی برای مدل ریاضی کیفی.
- در این طرح (مدل کمی‌و کیفی آبخوان دشت‌های حوضه تالار بابل و هراز) که مساله تداخل آب شور و شیرین در سواحل خزر مطرح می‌باشد، مدل مفهومی‌می‌باید سه‌بعدی تهیه می‌شد. طوری که ناحیه تداخل جهت جریان سنگ کف و رژیم جریان همگنی – ناهمگنی و محیط (متخلخل یا درز و شکافدار) و ... را بیان می‌کرد. در این گزارش همچنان که قبلا نیز ذکر شد، این مدل تهیه نشده است.
- در بخش (۲-۳-۲) بررسی اطلاعات موجود و تهیه داده‌های پایه در این فصل که به طور کامل در یک گزارش مطالعات پایه ارائه شده است، در این‌جا به طور خلاصه باید ارائه شود و آن هم قبل از مدل مفهومی و بعد از معادلات پایه. بنابراین ۳۵ صفحه مطلب در این مورد تکراری می‌باشد و بهتر است تا حدود ۱۰ صفحه کاهش یابد. در واقع در این مبحث باید خلاصه‌ای از گزارش مطالعات پایه به خصوص مواردی که برای تهیه مدل مفهومی لازم است، ارائه شود و تعدادی نقشه موردنیاز در مدل (درمقطع A3) نیز درگزارش آورده شود.
- درگام بعدی معادلات پایه باید ارائه شود.
- چگونگی تهیه مدل و یا انتخاب مدل مناسب ارائه نشده است.
- پس از تهیه مدل نحوه ورود داده‌ها شبکه‌بندی شرایط مرزی و اولیه ذکر شود و سپس مدل اجرا شود.

- طبق آن‌چه در دستورالعمل مدل‌سازی ذکر شد کلید مدل و به عبارت دیگر قلب فرایند مدل‌سازی واسنجی است که در این گزارش بسیار خلاصه ارائه شده است. به این صورت که واسنجی مدل جریان در شرایط ماندگار و غیرماندگار فقط در دو صفحه ارائه گردیده است. طبق دستورالعمل و آنچه در سطح دنیا رایج است تنظیم مدل باید در یک فصل جداگانه ارائه شود. هرچاه مشاهده‌ای باید تک تک مورد بحث قرار گیرد و هر گونه تغییرات در پارامترها چه به صورت دستی و یا اتوماتیک باید ذکر شود و با دلیل منطقی نتیجه نهایی پذیرفته شود. عدم دقت کافی و عدم وقت گذاشتن کافی در مرحله واسنجی مدل خطر تهیه مدل غیر واقعی آبخوان را افزایش می‌دهد. گزارشی با سطحی‌نگری در تنظیم مدل و یا عدم گزارش گام به گام واسنجی نمی‌تواند، مورد قبول واقع شود.
- پس از انجام مرحله واسنجی باید تحلیل حساسیت انجام شود که این گزارش فاقد این بخش می‌باشد.
- قبل از استفاده از مدل در مدیریت مدل تهیه شده برای این منطقه باید برای چند سال ترجیحا ۳ سال و حداقل یک سال با دوره زمانی ماهانه صحت‌سنجی شود که این مهم نیز در این گزارش ارائه نشده است.
- در بخش کاربرد مدل ریاضی به منظور بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در شرایط طبیعی و شرایط طرح
- در این بخش شرایطی به نام ترسالی، خشکسالی و میانگین برای دوره‌های هیدرولوژیکی تعریف و بر اساس آن مدل اجرا شده است تا در واقع مدل کنترل شود. در فرآیند آن تخلیه از چاه‌ها در تمام سه دوره یکسان فرض شده است و سایر پارامترهای بیلان برای ورود به مدل تعدیل شده است. اصولا مرحله کنترل مدل و صحت‌سنجی به این صورت انجام نمی‌شود و نمی‌توان بر اساس داده‌های فرضی و بیلان فرضی برای سه دوره هیدرولوژیکی این کار را انجام داد و اصولا این کارصحیح نمی‌باشد. صحت‌سنجی باید با داشتن مقادیر داده‌های مشاهده‌ای و به وقوع پیوسته برای یک دوره ترجیحا سه سال و یا حداقل یک سال با گام زمانی ماهانه انجام شود. به طور مثال سال مدل در این گزارش سال ۱۳۶۷ می‌باشد. صحت‌سنجی مدل باید برای سال‌های ۱۳۶۷، ۱۳۶۸و ۱۳۶۹ انجام شود. بنابراین مرحله صحت‌سنجی این گزارش نمی‌تواند، مورد قبول واقع شود.
- در بخش بررسی تحول نوسانات سطح زیرزمینی در شرایط طرح
- این بخش که استفاده از مدل در مدیریت می‌باشد باید بسیار کامل و جز به جز ارائه شود. به این صورت که در هر شبکه پتانسیل آب زیرزمینی مورد بررسی و در صورت مثبت بودن تعداد چاه‌ها و آبدهی آنها ارائه شود. از طرف دیگر می باید نتایج بهره‌برداری‌های جدید از آبخوان در نقاط کنترل (چاه‌های مشاهده‌ای) در سال‌های اول دوم سوم چهارم و پنجم پس از بهره‌برداری ارائه شود تا کاملا" اثرات برداشت‌های جدید آشکار شود. در این گزارش این بخش به خوبی رعایت شده است ولی اثرات برداشت برای سال‌های آینده را ندیده‌اند که باید اضافه شود.
- در بخش مدل کیفی آب زیرزمینی دشت تالار بابل و هراز
- چنان‌چه در دستورالعمل ارائه شده است در ابتدا باید خلاصه‌ای از وضعیت کیفی آبخوان که در واقع خلاصه شده چند صفحه‌ای گزارش مطالعات پایه کیفی می‌باشد ارائه شود به انضمام نقشه‌های پارامترهای کیفی به خصوص پارامتری که

می‌خواهد در مدل کیفی مورد بررسی قرارگیرد. به طور مثال نقشه هم کلر هم‌EC و هم‌T.D.S سپس مدل مفهومی‌کیفی ارائه شود که در این گزارش چنین مدلی تهیه نشده است.

- پس از تهیه مدل مفهومی‌با توجه به نوع پارامتر مورد بررسی معادلات پایه و سپس مدل ریاضی توسعه و یا تهیه شود. در این بخش باید علت انتخاب مدل خریداری شده بر اساس معیارهای مندرج در دستورالعمل ذکر شود. این گزارش فاقد این مراحل است.
- بخش بعدی مدل‌سازی شبکه‌بندی شرایط اولیه و مرزی و ورود داده‌ها می‌باشد که در این گزارش شبکه‌بندی مدل و نحوه انتخاب ابعاد شبکه طبق آنچه در این دستورالعمل ارائه شده است نیامده است. شرایط مرزی بیان شده است ولی علت انتخاب سال ۱۳۶۷ به عنوان شرایط اولیه ذکر نشده است.
- در این گزارش کلیه دبی‌های تغذیه و تخلیه در مدل کیفی آب زیرزمینی به عنوان تغذیه و یا تخلیه املاح منظور شده است و با توجه به آن مدل سه‌بعدی در نظر گرفته شده است. در این حالت شبکه‌بندی عمودی وبحث در مورد انتخاب ابعاد شبکه‌ها لازم است که در اینجا بحث نشده است. وقتی مدل سه‌بعدی تهیه می‌شود باید ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان نیز سه‌بعدی دیده شود. نحوه ورود داده‌ها باید مفصلا بحث شود به خصوص چگونگی انتقال آن در ابعاد مختلف مدل.
- در انتخاب اولیه ضرایب پخشیدگی برای منطقه مساله مقیاس و طول دامنه کار مهم می‌باشد. در حال حاضر هم بر اساس نوع بافت و هم بر اساس مقیاس کار این ضرایب در جداول و یا منحنی‌هایی ارائه شده است که در این دستورالعمل یک منحنی در این مورد ارائه شده است. در این گزارش نیز طبق تحقیقات دیگران ضرایب اولیه پخشیدگی در نظر گرفته شده است که قابل قبول می‌باشد ولی باید در فرآیند تنظیم مدل این ضرایب تدقیق شوند.
- پس از راه‌اندازی مدل شبیه‌سازی چنان‌چه در دستورالعمل مدل کیفی ذکر شده است باید تنظیم و تطبیق مدل انجام شود. در این مرحله نقاط کنترل همان چاه‌های نمونه برداری کیفی می‌باشند. مرحله تنظیم یا کالیبراسیون و یا واسنجی بدون شک مهم‌ترین مرحله مدل‌سازی تلقیمی‌شود. در این گزارش هیچ بحثی در مورد واسنجی مدل کیفی انجام نشده است. بنابراین این مدل نمی‌تواند مورد قبول باشد. ضمن اینکه در انتهای کالیبراسیون باید با ارائه نقشه‌های کیفی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و همچنین گراف‌ها و انجام محاسبات مربوط به مقایسه ارقام مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و ارائه نتایج مطلوبی در مورد اتمام مرحله کالیبراسیون انجام شود.
- پس از انجام کالیبراسیون تحلیل حساسیت انجام می‌شود. در این گزارش تحلیل حساسیت بدون انجام کالیبراسیون صورت گرفته است.
- در بخش استفاده از مدل در مدیریت کیفی آبخوان گزینه‌هایی باید طراحی شود که اجرای آن امکان‌پذیر باشد و نه اینکه اجرای آن هم فرضی باشد. چه در این بخش و در انتهای آن لازم است شرایطی فراهم شود تا مدیر و تصمیم‌گیرنده بتواند با استفاده از نتایج این مطالعه تصمیم نهایی خود را اتخاذ کند. در این گزارش کلیه گزینه‌ها حالت فرضی داشته و نمی توان آن را اجرا کرد.

- به طور مثال حذف املاح از نفوذ آب آبیاری و یا حذف کیفیت کلیه پارامترهای تغذیه و تخلیه آبخوان و... . کلیه این سناریوها فرض‌های غیرواقعی هستند.
- این گزینه‌ها را چگونه می‌توان در واقعیت انجام داد؟ آیا می‌توان آب برگشتی کشاورزی به آبخوان را در اکثر دشت‌های ایران تحت کنترل درآورد و تصفیه کرد و آن را بدون هیچ‌گونه املاحی به داخل آبخوان تزریق کرد؟!! و...
- همان‌طوری که ذکر گردید گزینه‌ها باید در جهت اهداف اولیه طرح باشد. چه هدفی دنبال می‌شده است و با توجه به آن گزینه‌های مدیریتی طراحی و نتایج آن مورد بررسی شخص مدیر قرار گیرد. اثر هر گزینه باید در نقاط کنترل (چاه‌های نمونه‌برداری کیفی) مورد ارزیابی قرار گیرد نه در گره‌های مدل. چه در صورتی که بخواهیم این مدل را با داده‌های کیفی مشاهده‌ای پس از سال تهیه مدل کنترل کنیم نقاط مشاهده‌ای همان نقاط نمونه‌برداری کیفی خواهد بود. در گره‌های مدل ما نقاط مشاهده‌ای نداریم.

در بخش پیشنهادات از کلی‌گویی باید پرهیز شود. توضیح واضحات هیچ سودی برای مسئول تصمیم‌گیری در مورد مدیریت کیفی آبخوان ندارد. در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی باید به صورت منطقه به منطقه مورد بحث قرار گیرد و تفسیر شود تا بتوان از آن نتیجه کاربردی گرفت. در این گزارش و در بخش پیشنهادات آن به صورت ریز بحث نشده است و بیش‌تر کلی گویی انجام شده که در بعضی از موارد بدون انجام مدل نیز ذکر چنین جملاتی ممکن بود.

فصل ۴

مطالعه موردی

٤-۱- عنوان

مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت بردسیر کرمان

٤-۲- خلاصه

این مطالعه به منظور پیش‌بینی رفتار آبخوان دشت بردسیر و در چارچوب برنامه تامین آب آشامیدنی شهر کرمان انجام شده است. مدل ریاضی آبخوان دشت بر پایه داده‌های سال ۱۳۴۹ تا ۱۳۷۷ و با استفاده از کد MODFLOW تهیه شده است. در پایان بیلان به دست آمده از اطلاعات صحرایی با بیلان محاسبه شده به وسیله مدل مقایسه شده است که نتایج در حد مناسبی قابل قبول بوده است.[۱]

٤-۳- مقدمه و کلیات

محدوده مطالعاتی بردسیر بین ۵۶ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۵۶ دقیقه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۲۴ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۰ درجه و ۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی در راستای تقریبی جنوب شرقی ـ شمال غربی قرار دارد. مساحت این حوضه تا محل خروجی از دشت ۴۰۰۷ کیلومتر مربع است که از این مقدار ۲۲۹۷ کیلومتر مربع را ارتفاعات و بقیه را دشت تشکیل داده است (شکل ۴-۱).

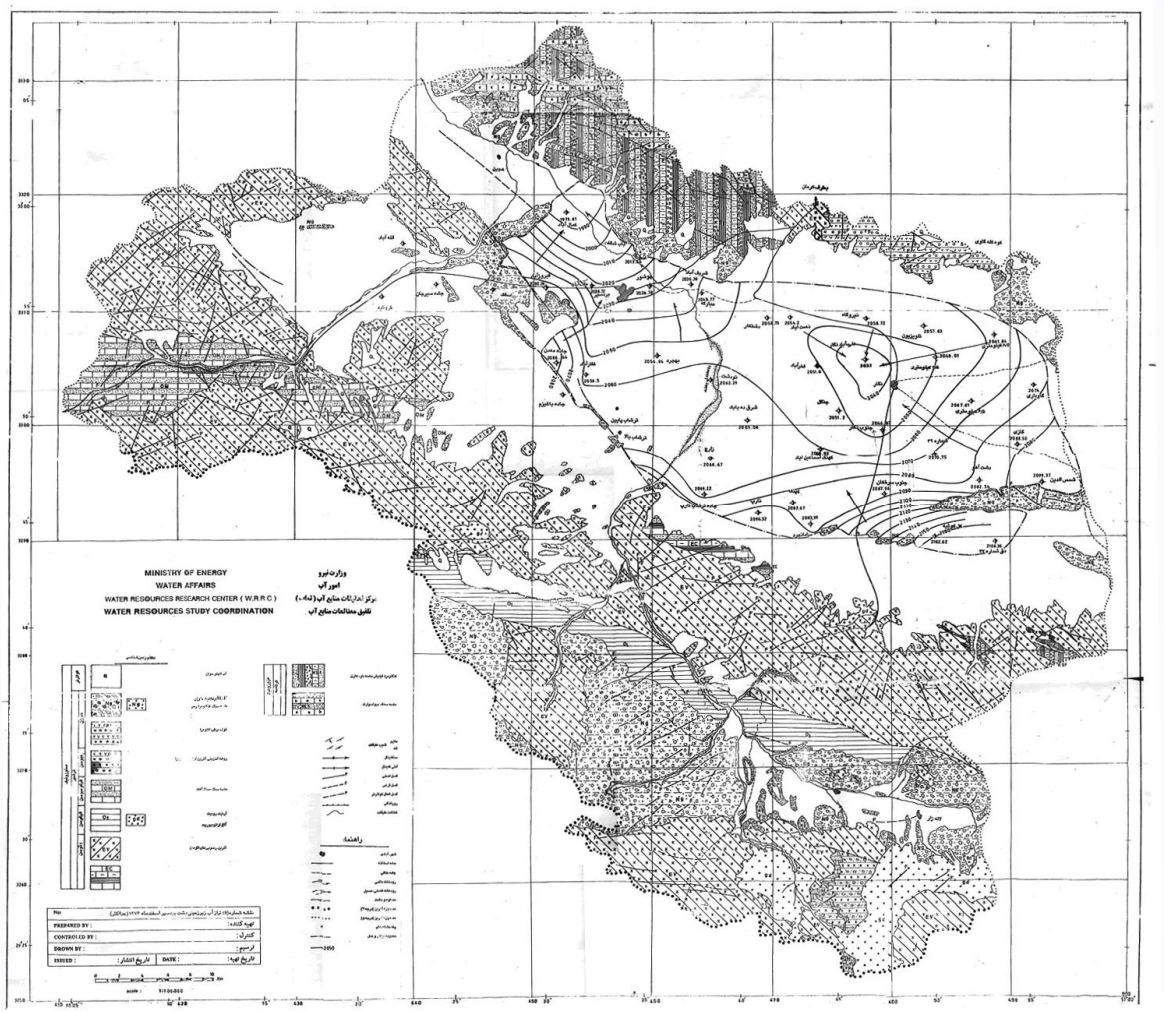
رسوبات کواترنر که پهنه اصلی دشت و آبخوان آن را تشکیل داده شامل تراس‌های قدیمی و جدید و همچنین پهنه‌های ماسه‌ای و بادبزن آبرفتی است. با وجود این که آبراهه‌های اصلی و فرعی در تمام جهات این حوضه از سمت ارتفاعات به سوی دشت کشیده شده‌اند، ولی رودخانه لاله‌زار مهم‌ترین رودخانه حوضه بوده و با اهمیت‌ترین بادبزن آبرفتی دشت را به لحاظ وسعت ضخامت و کیفیت و کمیت منابع آب تشکیل می‌دهد.

ضخامت آبرفت بر اساس حفاری‌های اکتشافی در ابتدای بادبزن آبرفتی ۲۵۰ متر می‌باشد. کیفیت آب‌های زیرزمینی در ارتفاعات لاله‌زار و ابتدای ورودی به دشت خوب و سپس در امتداد دشت به تدریج افت می‌کند. در سایر مسیل‌ها و رودخانه‌های فصلی حوضه عبور آب از سازندهای نئوژن باعث افزایش شدید املاح شده و کیفیت آب به شدت افت می‌کند. منابع آب زیرزمینی نیز تحت تاثیر سازندهای حاشیه ارتفاعات قرار گرفته و تغییرات کیفی آب در مجاورت رسوبات نئوژن محسوس است.

میانگین بارندگی درازمدت چند ساله در ارتفاعات ۲۳۶ و در دشت ۱۷۱ میلی‌متر و میانگین بده رودخانه آب بخشا در ایستگاه گدارزار چوئیه از سال ۵۸ - ۵۷ تا ۷۷ - ۷۶ برابر ۲/۶ متر مکعب در ثانیه می‌باشد.

میزان برداشت از چاه‌های عمیق و نیمه عمیق در محدوده بیلان و مدل با توجه به آخرین آماربرداری (سال ۷۶ - ۷۵) برابر ۲۶۹/۱ میلیون متر مکعب می‌باشد که از این رقم حدود ۶/۱ میلیون متر مکعب برای تامین آب آشامیدنی شهر رفسنجان اختصاص داده می‌شود. تخلیه قنات‌ها در محدوده بیلان برابر ۱۵/۹ میلیون متر مکعب در سال است.

۱- پایه اطلاعات قابل دسترس، نتیجه حاصل از ارزیابی قسمت‌های مختلف مطالعه موردی حاضر در پیوست این راهنما و در قالب پرسشنامه‌های ارزیابی مدل آب زیرزمینی به عنوان نمونه ارائه شده است.



شکل ٤-۱- نقشه‌ی زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه‌ی بردسیر [۱]

بیش‌ترین میزان برداشت ۲۶۴/۲ میلیون متر مکعب در سال و برای مصرف کشاورزی بوده و سایر مصارف نیز به ترتیب برای صنعت و آشامیدن برابر با ۵/۵ و ۱/۵۳ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. با توجه به هیدروگراف مربوطه سطح آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی این دشت در سالیان آخر سیر نزولی داشته که به همین دلیل نیز دشت به عنوان منطقه ممنوعه اعلام شده است. میزان افت در سال آبی ۷۷ – ۷۶ برابر ۳۱ سانتی متر برآورده شده است.

٤-٤- وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

٤-٤-۱- زمین‌شناسی

الف- چینه‌شناسی

منطقه مورد مطالعه در زون سنندج سیرجان قرار دارد. قدیمی‌ترین سنگ‌های تشکیل‌دهنده این محدوده مربوط به دوره کرتاسه است که با وسعت اندکی بیش‌تر نواحی شمالی حوضه را در بر گرفته است. توف، کنگلومرا، اگلومرا و ماسه سنگ ائوسن بیش‌ترین

وسعت ارتفاعات را شامل شده و مارن، ماسه سنگ و سنگ‌های ولکانیکی نئوژن قسمت‌هایی از ارتفاعات جنوبی و جنوب باختری حوضه و همچنین تپه ماهورهای خاوری و شمالی حوضه را به وجود آورده است. ویژگی‌های سنگ‌شناسی و هیدروژئولوژیک این سنگ‌ها به ترتیب زیر می‌باشد:

کرتاسه زیرین (K1): از مارن سنگ دولومیت سنگ آهک خرد شده و ماسه سنگ تشکیل شده است. اثر این سازند در تغذیه آبخوان به علت گسترش کم و وجود مارن و سیلت ناچیز است.

کرتاسه بالایی (K2): شامل فیلیش و مارن بوده که فیلیش ها به علت مقاومت در برابر فرسایش برخی ارتفاعات را تشکیل داده‌اند. این مجموعه رسوبی با وجود گسترش زیاد در منطقه به علت تراوایی اندک فاقد اهمیت است.

ولکانیک‌های ائوسن (Er): به خصوص در ارتفاعات جنوبی گسترش زیادی داشته و برخی از ارتفاعات را تشکیل داده‌اند. همچنین شامل توالی رسوبات دریایی با لایه بندی شامل ماسه سنگ و کنگلومرا با سیمان آهکی می‌باشند. نفوذپذیری این سنگ‌ها در عمق کم و در بخش های سطحی زیاد بوده و در تغذیه آبرفت دشت موثر است. بر اثر عملکرد تکتونیک گسل‌ها و شکستگی‌های عمیق در آنها به وجود آمده است.

الیگومیوسن (Olm): شامل کنگلومرا ماسه سنگ و مارن بوده و با توجه به وجود املاح تبخیری آب‌های سطحی و زیرزمینی را شدیدا با افت کیفیت روبرو نموده است.

نئوژن (Ng): دارای گسترش زیادی در منطقه است. از ماسه سنگ و کنگلومرا و سیلت و مارن با لایه‌های گچی و نمکی تشکیل شده است. نفوذپذیری این سنگ‌ها در واحدهای ماسه سنگی و کنگلومرایی زیاد و دارای ذخایر آب بوده و از طریق حفر چاه بهره برداری می‌شوند. آب های زیرزمینی در این سازند از کیفیت پایینی برخوردار می‌باشند.

بادبزن آبرفتی قدیمی(Q1): رسوبات قدیمی و سخت شده کواترنر

بادبزن آبرفتی جوان (Q2): قشر ضخیمی از آبرفت‌های پای ارتفاعات با نفوذپذیری بالا

آبرفت های جدید (Qal): رسوبات سیلابی و رودخانه‌ای پوشاننده تمامی‌سطح دشت

تپه‌های شن و ماسه‌ای (Qs): از جنس ماسه بادی به طور پراکنده در قسمت‌های مرکزی بر روی آبرفت‌های جدید (شکل ۴-۱).

ب- زمین ساخت و تکتونیک

منطقه مورد مطالعه شدیدا تحت حرکات تکتونیکی قرار گرفته و آثار این حرکات به صورت گسل‌ها و جابه‌جایی‌های بزرگ در ارتفاعات حاشیه دشت و یا در آبرفت‌های سطح منطقه دیده می‌شود. راستای غالب گسل‌ها شمال باختری ـ جنوب خاوری می‌باشد. ادامه تعدادی از این گسل‌ها در درون دشت باعث جابه‌جایی در آبرفت و سنگ کف آبخوان آبرفتی شده است، بنابراین برخی از این گسل‌ها در تغذیه آب زیرزمینی منطقه بسیار موثر بوده و باعث انتقال آب از ارتفاعات به دشت می‌شوند.

٤-٤-٢- توپوگرافی و ریخت شناسی

وسعت ارتفاعات حوضه‌آبریز دشت بردسیر ۲۲۹۷ کیلومتر مربع می‌باشد که بیش‌تر در جنوب منطقه گسترش دارند. ماسه سنگ‌ها مارن‌ها و سیلت‌های نئوژن که بر روی ولکانیک‌های ائوسن قرار دارند در پهنه وسیعی گسترش داشته و به علت بالا بودن فرسایش‌پذیری اغلب فرسایش یافته و دره‌های نسبتا بزرگی را به وجود آورده‌اند. دره‌هایی که در سنگ‌های ولکانیکی ایجاد شده‌اند، اغلب دارای شیب تند و U شکل می‌باشند. مانند این دره‌ها در ابتدای ورود رودخانه آب بخشا به دشت بردسیر وجود دارد.

فرسایش باد در سطح دشت سبب انتقال رسوبات ریزدانه از نوع ماسه و سیلت و رس شده و در نواحی میانی دشت تل ماسه و تپه‌های شنی را به وجود آورده است.

٤-٤-٣- هیدروژئولوژی

الف- مشخصات آبخوان

با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از نمودارهای (Log) حفاری چاه‌های اکتشافی، پیزومترها و مقاطع زمین‌شناسی آبخوان دشت از نوع آزاد بوده و شواهد کافی بر وجود آبخوان تحت فشار و آبخوان نشتی وجود ندارد. همچنین نتایج مطالعات ژئوفیزیکی نشان می‌دهد که بیش‌ترین ضخامت آبخوان حدود ۲۶۰ متر در شرق منطقه و کم‌ترین ضخامت آن حدود ۵۰ متر در منطقه هجین می‌باشد. جبهه تغذیه یا ورودی آب زیرزمینی ارتفاعات جنوبی ـ غربی و شرقی بادبزن آبرفتی آب بخشا است.

واحدهای زمین‌شناسی Q2 Q1 و Qal تشکیل یک واحد آب – چینه‌ای را داده‌اند و می‌توان گفت که تنها یک محیط متخلخل آبرفتی به وجود آمده است. بر اساس داده‌های مختلف به‌دست آمده از آزمایش‌های پمپاژ در نقاط مختلف دشت بردسیر و نیز با استفاده از اطلاعات ژئوالکتریکی نقشه هم قابلیت انتقال دشت[1] تهیه شده است. بر اساس این نقشه حداقل قابلیت انتقال آبخوان ۲۵۰ و حداکثر آن ۴۰۰۰ متر مربع در روز می‌باشد. براساس منحنی‌های هم قابلیت انتقال و ضخامت اشباع آبخوان، قابلیت هدایت هیدرولیکی افقی (kxy) در نقاط مختلف آبخوان محاسبه شده است.

بر پایه‌ی اطلاعات به دست آمده، مدل مفهومی‌آبخوان بردسیر به صورت نمودار بلوکی تهیه شده است (شکل ۴-۲).

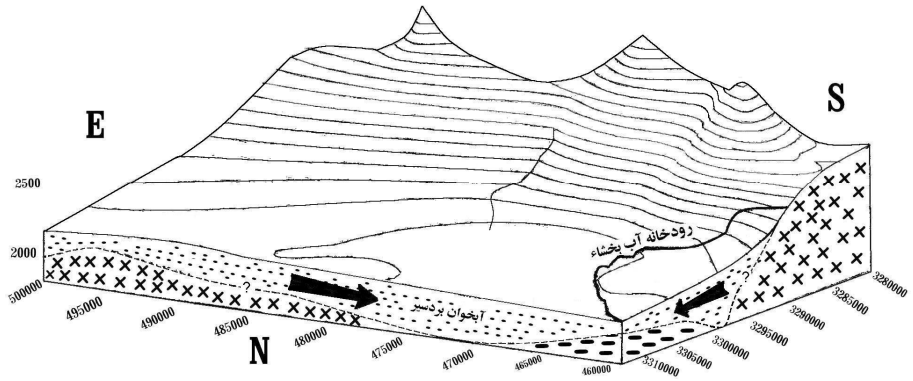
ب- بیلان آب زیرزمینی

گسترش محدوده بیلان ۸۵۷ کیلومتر مربع است که تعداد ۳۸ پیزومتر و ۳۰۰ حلقه چاه در این گستره وجود دارد (آمار سال ۱۳۷۷). رودخانه آب بخشا مهم‌ترین رودخانه منطقه بوده و در غرب محدوده بیلان قرار می‌گیرد. طول این رودخانه در محدوده بیلان حدود ۳۰ کیلومتر می‌باشد.

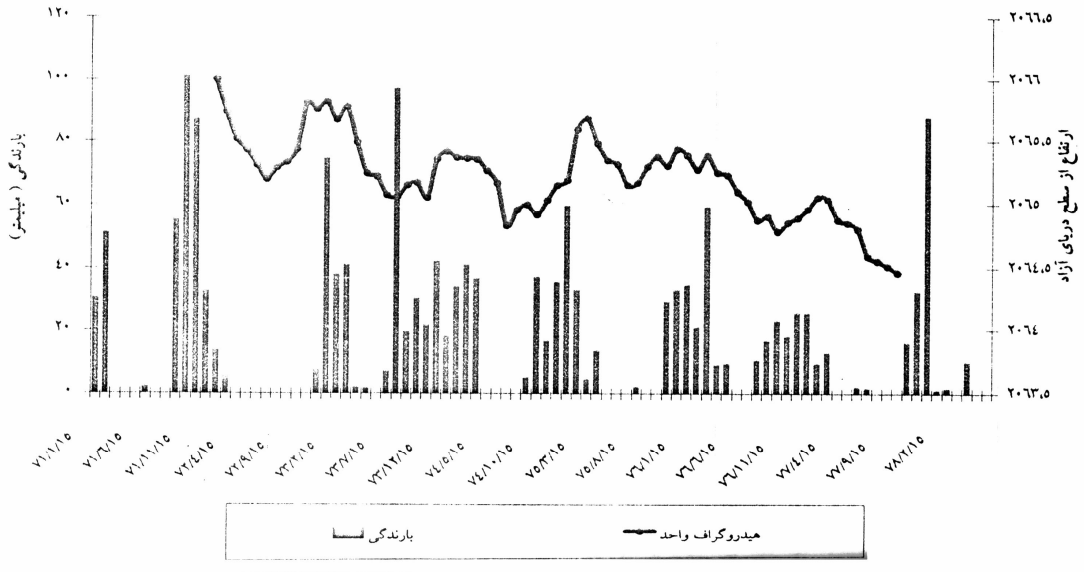
اندازه‌گیری سطح آب در این دشت از سال ۱۳۶۶ آغاز شده و تقریبا به طور منظم هر ماهه انجام می‌شود. آبنمود (هیدروگراف) کلیه چاه‌های مشاهده‌ای در گستره بیلان رسم و پردازش‌های لازم انجام شده است. ضمن این که نواقص آماری مربوط به سطح آب بعضی از چاه‌های مشاهده‌ای تا جای ممکن برطرف شده و داده‌های مشکوک و پرت نیز اصلاح شده‌اند. آبنمود واحد دشت بردسیر در شکل (۴-۳) نمایش داده شده است.

مولفه‌های بیلان آب زیرزمینی شامل مولفه‌های ورودی به محدوده بیلان (بارندگی در سطح دشت جریان زیرزمینی ورودی نفوذ از جریان‌های سطحی و نفوذ از مصارف آب) و مولفه‌های خروجی از محدوده بیلان (جریان زیرزمینی خروجی و تخلیه از طریق چاه و قنات) می‌باشد. بیلان تهیه شده برای دشت مورد مطالعه در جدول (۴-۱) ارائه شده است.

1- isotransmissivity map



شکل ٤-۲- مدل مفهومی آبخوان بردسیر (پیکان‌ها جهت جریان آب زیرزمینی را نشان می‌دهند)



شکل ٤-۳- آب‌نمود معرف دشت بردسیر

جدول ٤-۱- بیلان آب زیرزمینی در گستره دشت بردسیر (بر حسب میلیون متر مکعب در سال)

تغذیه	MCM	تخلیه	MCM
برگشتی کشاورزی آشامیدنی صنعت (چاه)	۷۳/۱	تخلیه چاه‌ها	۲۶۹/۱
برگشتی قنات‌ها	۵/۶	تخلیه قنات‌ها	۱۵/۹
بارندگی در سطح دشت	۲۴	تبخیر از آب زیرزمینی	۰
جریان زیرزمینی ورودی	۱۳۴	جریان زیرزمینی خروجی	۱۴/۶
نفوذ از جریان‌های سطحی	۴۴/۳	خروجی و زهکش از آب زیرزمینی	۰
نفوذ از مصارف آب	۷۸/۷	تخلیه چاه و قنات و چشمه آبرفتی	۲۸۵
جمع تغذیه	۲۸۱	جمع تخلیه	۲۹۹/۶
تغییرات حجم مخزن	-۱۸/۶		

٤-٥- طراحی مدل

٤-٥-١- معرفی کد و رابط گرافیکی

با توجه به ویژگی‌های کلی برنامه MODFLOW این کد جهت به‌کارگیری در ساخت مدل مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از بین رابطهای گرافیکی این برنامه نرم‌افزار Processing Modflow (PMWin) برای پیش‌پردازش و پس‌پردازش داده‌های ورودی و خروجی مدل انتخاب شده است.

٤-٥-٢- رابطه بین مدل مفهومی و مدل عددی

مدل جریان آب زیرزمینی دشت بردسیر شامل دو قسمت کد و مجموعه داده‌ها می‌باشد. این مدل دارای ویژگی‌هایی همچون ابعاد مکانی، ابعاد زمانی، شرایط اولیه، شرایط مرزی و خصوصیات هیدرولیکی می‌باشد. در مطالعات مدل دشت بردسیر اندازه سلول‌های شبکه ۱۰۰۰ × ۱۰۰۰ متر انتخاب شده است. تعداد کل سلول‌ها ۸۰۱ عدد می‌باشد. مشخصات مدل در جدول (۴-۲) ارائه شده است.

جدول ٤-٢- مشخصات مدل دشت بردسیر

نوع مدل از نظر گسترش مکانی	دوبعدی در سطح (two dimensional areal)
طول مدل در جهت محور x	۵۰ کیلومتر
طول مدل در جهت محور y	۳۰ کیلومتر
تعداد سلول‌ها در جهت x	۵۰
تعداد سلول در جهت y	۳۰
مساحت محدوده بیلان	۸۵۷ کیلومتر
مساحت محدوده مدل	۸۰۰ کیلومتر مربع
تعداد واحدهای آب-چینه‌ای	۱ واحد
نوع آبخوان	آزاد
زمان	یک روز
فاکتور آنیزوتروپی (Kcolumn / Krow)	۱/۱۷۵
داده‌های مدل که به برنامه اصلی معرفی شده‌اند.	ارتفاع سطح فوقانی لایه آبدار ارتفاع سطح زیرین لایه آبدار قابلیت هدایت شرایط مرزیKهیدرولیکی
مادول هایی که در مدل استفاده شده‌اند.	Recharge package Well package
حل کننده (solver)	SIP

در این مدل هر دو رژیم ماندگار و ناماندگار مطالعه شده‌اند. در رژیم ماندگار یک دوره تنش و یک گام زمانی یک روزه مطالعه شده و سپس رژیم ناماندگار اجرا شده است. جواب‌های رژیم ماندگار به عنوان شرایط اولیه را برای رژیم غیرماندگار استفاده شده است. آبدهی ویژه (Sy) به صورت میانگین برای کلیه گره‌ها ۵ درصد در نظر گرفته شد و میانگین هدایت هیدرولیکی آبخوان نیز تقریبا ۱۰ متر در روز برآورد شد.

برای تعریف عمق سنگ کف آبخوان، فایل مربوط به ضخامت منطقه اشباع آبخوان از فایل مربوط به ارتفاع سطح زمین کسر شده و معادل عمق سنگ کف آبخوان در نظر گرفته شده است. این عمل در محیط Excel صورت گرفته است. برای تعریف ارتفاع سطح فوقانی لایه آبدار، از نقشه‌های توپوگرافی دشت بردسیر با دقت ۱ متر استفاده شده است. فایلی که به این منظور ایجاد شده برای محاسبه ضخامت اشباع آبخوان، قابلیت انتقال و نیز نفوذ از بارندگی استفاده شده است. قابلیت هدایت هیدرولیکی آبخوان در محیط Excel و از تقسیم فایل قابلیت انتقال آبخوان بر ضخامت منطقه اشباع به دست آمده است. نقشه ارتفاع سطح ایستابی با استفاده از نرم‌افزار Surfer با دادن مختصات نقاط روی منحنی‌ها و مختصات نقاط پیزومترها تهیه شده است.

در این مطالعه مرزها در مدل مفهومی (تهیه بیلان) مشخص شده و در طی فرایند واسنجی تصحیح شده‌اند. خطوط جریان منطبق بر حاشیه آبخوان به عنوان مرز بدون جریان[1] و خطوط پتانسیل منطبق بر حاشیه آبخوان مرز با بار هیدرولیکی ثابت[2] را تشکیل می‌دهند.

علاوه بر آن مرزهای ورودی و خروجی در مدل‌سازی رژیم ناماندگار بارهای هیدرولیکی ثابتی نداشته بلکه در هر دوره نوسان نشان می‌دهند. به همین دلیل از بسته نرم‌افزاری Time Variant Specific Head استفاده شده است که تغییرات جریان ورودی و جریان خروجی از مرزها در طول دوره‌های تنش منظور گردیده است.

٤-٥-٣- واسنجی

در این مطالعه واسنجی به روش سعی و خطا انجام شده است. بدین صورت که بار هیدرولیکی به عنوان مقدار واسنجی و نیز هدف واسنجی انتخاب شده و تعداد ۳۰ پیزومتر برای واسنجی مورد استفاده قرار گرفته است. واسنجی مدل برای شرایط ماندگار و ناماندگار به ترتیب زیر انجام شده است:

الف- واسنجی در رژیم جریان ماندگار

با محاسبه مقادیر اختلاف بین بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده و بار هیدرولیکی مشاهده شده مقادیر باقیمانده‌ها به دست آمده و مورد تحلیل آماری قرار گرفته است. این تحلیل با توجه به سه معیار آماری خطای میانگین[3] قدر مطلق خطای میانگین[4] و ریشه خطای مربعات میانگین[5] انجام شده است. با وجودی که در برخی از موارد اختلاف بین مقدار مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در بعضی از پیزومترها زیاد می‌باشد ولی لازم به یادآوری است که الگوی منحنی‌های هم پتانسیل شبیه‌سازی شده از الگوی منحنی‌های مشاهده شده پیروی می‌کند که این مساله از دید واسنجی مدل دارای اهمیت است.

با مراجعه به نقشه توزیع خطا (شکل ۴-۴) برای رژیم ماندگار دیده می‌شود که توزیع خطا در دشت تقریبا یکنواخت است و تقریبا در ۸۵ درصد آبخوان خطای نابهنجاری دیده نمی‌شود.

1- no - flow boundary
2- constant - head
3- ME: mean error
4- MAE: mean absolute error
5- RMS: root mean squared mean

در این مطالعه همچنین مولفه‌های بیلان شبیه‌سازی شده توسط مدل با مولفه‌های بیلان محاسبه‌ای مقایسه شده است (جدول ۴-۳).

٤-٥-٤- آنالیز حساسیت

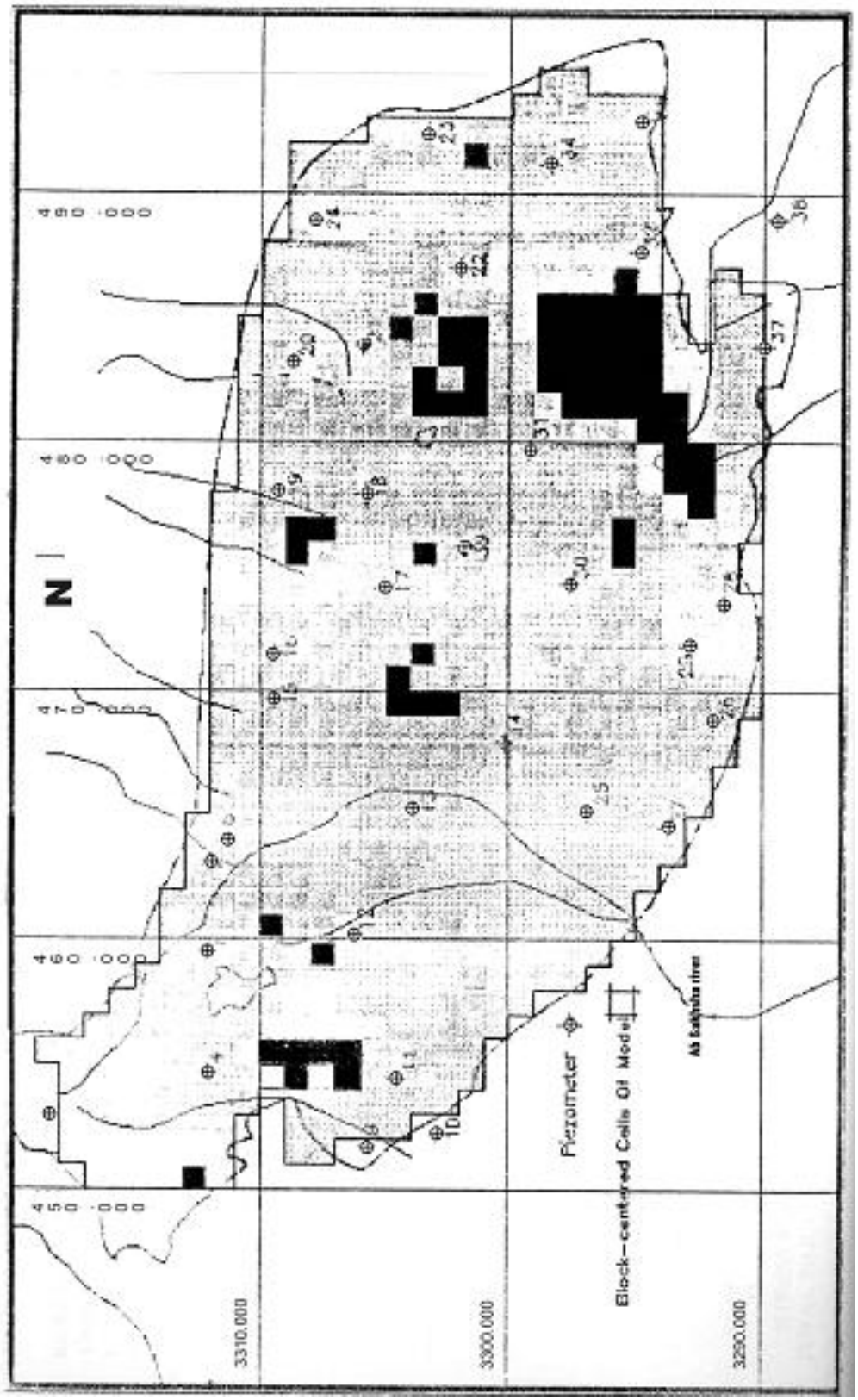
حساسیت مدل تهیه شده نسبت به نفوذ از رودخانه زیاد می‌باشد. پس از آزمون و خطاهای زیاد مشخص شده است که شکل منحنی‌های آب زیرزمینی در اطراف رودخانه شدیدا به میزان نفوذ از آن بستگی دارد. مدل در دو حالت مختلف در رابطه با حساسیت مدل به نفوذ از رودخانه اجرا شده است: ۱- حالتی که مدول رودخانه فعال بوده است ۲- حالتی که مدول رودخانه فعال نبوده است. سپس نتایج این دو حالت با یکدیگر مقایسه شده و تحلیل باقی‌مانده‌ها صورت گرفته است. نتیجه این تحلیل گویای مطلب مزبور بوده است.

مدل در قبال تغییر برداشت نیز حساسیت زیادی نشان داده است.

حجم ورودی از مرزها در مدل نسبت به تغییرات آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) نیز حساسیت نشان داده است.

ب- واسنجی در جریان غیرماندگار

پراکنش نگار برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مشاهده شده تهیه شده است (شکل ۴-۶) اگرچه خطای واسنجی بر روی نمودار مشهود است ولی یک هم خوانی نسبی بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر شبیه‌سازی شده وجود دارد.



شکل ٤-٤- نقشه توزیع خطا در حالت رژیم ماندگار

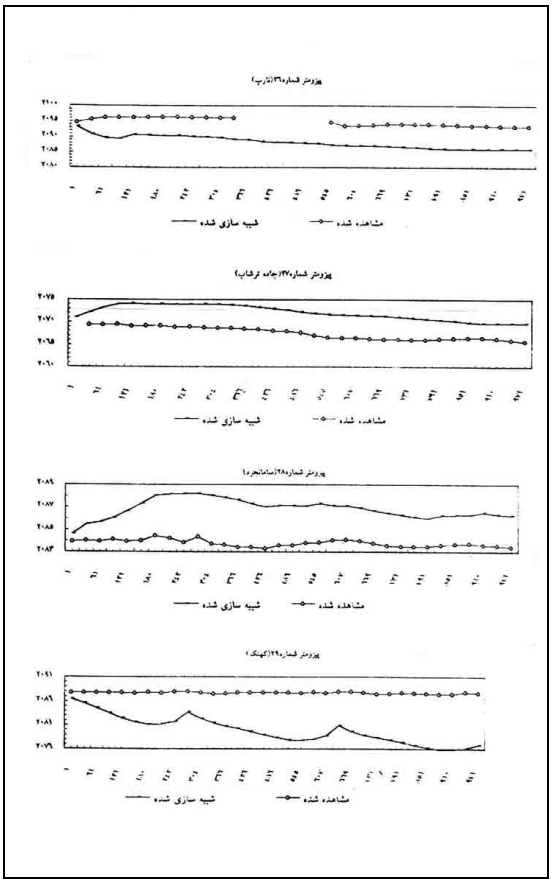
جدول ٤-۳- مولفه‌های بیلان آب زیرزمینی الف- شبیه‌سازی شده ب-محاسبه شده

ب - بیلان شبیه‌سازی شده (میلیون متر مکعب)

آب برگشتی کشاورزی آشامیدنی صنعت (چاه)	۷۳/۱۰۷۵	تخلیه (چاه)	۲۸۹/۱
برگشتی قنات‌ها	۵/۵۶۳	تخلیه (قنات‌ها)	۱۵/۹
بارندگی در سطح دشت	۲۳/۲۸	تبخیر از آب زیرزمینی	۰
جریان زیرزمینی ورودی	۱۳۳/۴۵	جریان زیرزمینی خروجی	۱۵/۸۹
نفوذ از جریان‌های سطحی	۴۴/۳	خروجی و زهکشی از آب زیرزمینی	۰
نفوذ از مصارف آب	۷۸/۶۷۲۵	تخلیه چاه و قنات و چشمه آبرفتی	۲۸۵
جمع تغذیه	۲۷۹/۷۰۳	جمع تخلیه	۳۰۰/۸۹
تغییرات حجم مخزن	-۲۱/۱۸۸		

ب ـ بیلان محاسبه شده (میلیون متر مکعب)

تغذیه		**تخلیه**	
برگشتی کشاورزی آشامیدنی صنعت (چاه)	۷۳/۱	تخلیه چاه‌ها	۲۶۹/۱
برگشتی قنات‌ها	۵/۶	تخلیه قنات‌ها	۱۵/۹
بارندگی در سطح دشت	۲۴	تبخیر از آب زیرزمینی	۰
جریان زیرزمینی ورودی	۱۳۴	جریان زیرزمینی خروجی	۱۴/۶
نفوذ از جریان‌های سطحی	۴۴/۳	خروجی و زهکش از آب زیرزمینی	۰
نفوذ از مصارف آب	۷۸/۷	تخلیه چاه و قنات و چشمه آبرفتی	۲۸۵
جمع تغذیه	۲۸۱	جمع تخلیه	۲۹۹/۶
تغییرات حجم مخزن	-۱۸/۶		



شکل ٤-۵- مقایسه بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده

لازم به ذکر است که در این رژیم آبدهی ویژه با توزیع‌های مختلف به مدل معرفی شده است و با آزمون و خطاهای متوالی بهترین توزیع به‌دست آمده است. حساسیت مدل در این رژیم به آبدهی ویژه و نوسانات آن در محدوده مورد نظر زیاد نبوده است. مشخصات مدل به ترتیب زیر می‌باشند:

جدول ٤-٤- مشخصات مدل در رژیم ناماندگار

نوع مدل جریان	ناماندگار
زمان	یک دوره یک ساله شامل ۱۲ دوره تنش با گام‌های زمانی ۳۰،۲۹ و ۳۱ روزه
فاکتور آنیزوتروپی	۱/۱۷۵
داده‌های مدل که به برنامه اصلی معرفی شده‌اند	ارتفاع سطح بالایی لایه آبدار ارتفاع سطح زیرین لایه آبدار هدایت هیدرولیکی (K) شرایط مرزی جدید آبدهی ویژه
مادول‌های بکار رفته در مدل	برنامه چاه برنامه تغذیه
حل‌کننده	PCG2
	TIME VARIANT CONSTANT HEAD CHD1

در طی آزمون و خطا سه پارامتر زیر (به ترتیب اهمیت) به صورت پی در پی کنترل شد:

- بیلان سالانه محاسبه شده توسط مدل و حداقل رساندن درصد اختلاف تا یک درصد
- حجم ورودی و خروجی زیرزمینی از مرزهای با بار هیدرولیکی ثابت
- انطباق بین منحنی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده تا حداکثر ممکن

برای بررسی بیلان محاسبه شده توسط مدل و درصد اختلاف آن، فایل Output.dat در شکل (۴-۶) ارائه شده است. درصد اختلاف در رژیم غیرماندگار یک درصد است و کمبود ۲۱ میلیون متر مکعب در سال نیز نشان‌دهنده بیلان منفی در آبخوان می‌باشد.

مقدار حجم آب زیرزمینی وارد شده از مرز با پتانسیل ثابت ۱۳۵ میلیون متر مکعب است که با حجم محاسبه شده در بیلان آب زیرزمینی (۱۳۳/۵ میلیون متر مکعب) هم‌خوانی دارد.

همچنین پراکنش‌نگار بین منحنی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در کلیه پیزومترها تهیه شده که در برخی قابل قبول و در شش تا از آنها نامناسب است.

```
MODFLOW - PMWIN EDUCATIONAL RELEASE
Compiled by Wen-Hsing Chiang (AUG. 1996)
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 31 IN STRESS PERIOD 12
---------------------------------------------------------------------------
0          CUMULATIVE VOLUMES      L**3                 RATES FOR THIS TIME STEP    L**3/T
           ----------                                   ----------

             IN:                                          IN:
             ---                                          ---
               STORAGE =  0.11810E+09                       STORAGE =  0.27639E+06
               CONSTANT HEAD =  0.13345E+09                 CONSTANT HEAD =  0.36412E+06
               WELLS =  0.00000                             WELLS =  0.00000
               RECHARGE =  0.67580E+08                      RECHARGE =  83740.
0              TOTAL IN =  0.31913E+09                      TOTAL IN =  0.72425E+06
0            OUT:                                         OUT:
             ----                                         ----
               STORAGE =  0.96902E+08                       STORAGE =  50605.
               CONSTANT HEAD =  0.15895E+08                 CONSTANT HEAD =  43923.
               WELLS =  0.20637E+09                         WELLS =  0.63011E+06
               RECHARGE =  0.00000                          RECHARGE =  0.00000
0              TOTAL OUT =  0.31916E+09                     TOTAL OUT =  0.72464E+06
0              IN - OUT =  -31488.                          IN - OUT =  -388.31
0          PERCENT DISCREPANCY =      -0.01                PERCENT DISCREPANCY =      -0.05


      TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 31 IN STRESS PERIOD 12
                 SECONDS      MINUTES      HOURS       DAYS        YEARS
                 -----------------------------------------------------------
   TIME STEP LENGTH      86400.0      1440.00      24.0000      1.00000     0.273785E-02
   STRESS PERIOD TIME    0.267840E+07  44640.0      744.000      31.0000     0.848734E-01
TOTAL SIMULATION TIME    0.315360E+08  525600.      8760.00      365.000     0.999316
```

شکل ٤-٦- فایل خروجی نهایی مدل

٤-٥-٥- ارزیابی مدل

در این مرحله میزان تطبیق مدل با واقعیت مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف در این قسمت دست‌یابی به اطمینان بیش‌تر نسبت به مدل با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های واسنجی شده برای رسیدن به مجموعه جدیدی از داده‌ها می‌باشد. در این مطالعه سال آب ۷۸ – ۷۷ برای ارزیابی مدل انتخاب شده است. نتایج در شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) ارائه شده است.

٤-٥-٦- پیش‌بینی

در این مطالعه یک سناریو تدوین و رفتار سامانه برای سناریو شبیه‌سازی شده است. میزان عدم اعتماد به این شبیه‌سازی به دو عامل میزان عدم اعتماد به پارامترهای واسنجی شده و عدم اعتماد به تنش‌های هیدرولوژیکی آینده دارد. هر چقدر مدل واسنجی شده به واقعیت نزدیک‌تر باشد، درصد اطمینان به مدل تهیه شده بیش‌تر و پیش‌بینی‌ها به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود. ضمن آن که حوادثی از قبیل دوره‌های خشک، مرطوب و دخالت بشر نیز می‌تواند پیش‌بینی‌های انجام شده را از واقعیت دور نماید. در مدل واسنجی شده در این مطالعه مقادیر پارامترهای MAE ME و RMS اندک بودند (حدود ۲/۵ متر به طور متوسط برای کل آبخوان که دارای اهمیت نمی‌باشد). همچنین در پیش‌بینی‌ها افزایش برداشتی منظور نشده چون فرض بر آن است که برداشت از آبخوان ممنوع می‌باشد.

```
MODFLOW - PMWIN EDUCATIONAL RELEASE
 Compiled by Wen-Hsing Chiang (AUG. 1996)
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 31 IN STRESS PERIOD 32
 ----------------------------------------------------------------------------
0          CUMULATIVE VOLUMES      L**3                    RATES FOR THIS TIME STEP     L**3/T
           ------------------                              ------------------------

             IN:                                             IN:
             ---                                             ---
               STORAGE =  0.25660E+09                          STORAGE =  28780.
           CONSTANT HEAD =  0.32560E+09                    CONSTANT HEAD =  0.31019E+06
              WELLS =  0.00000                             WELLS =  0.00000
             RECHARGE =  0.17284E+09                         RECHARGE =  0.46797E+06
0            TOTAL IN =  0.75504E+09                       TOTAL IN =  0.80693E+06
0            OUT:                                            OUT:
             ----                                            ----
               STORAGE =  0.17422E+09                          STORAGE =  0.12521E+06
           CONSTANT HEAD =  0.46064E+08                    CONSTANT HEAD =  51731.
              WELLS =  0.53476E+09                         WELLS =  0.63011E+06
             RECHARGE =  0.00000                           RECHARGE =  0.00000
0            TOTAL OUT =  0.75505E+09                      TOTAL OUT =  0.80705E+06
0            IN - OUT =  -6912.0                         IN - OUT =  -113.75
0         PERCENT DISCREPANCY =          0.00             PERCENT DISCREPANCY =         -0.01


          TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 31 IN STRESS PERIOD 32
                     SECONDS      MINUTES      HOURS       DAYS        YEARS
          ------------------------------------------------------------------
       TIME STEP LENGTH       86400.0      1440.00      24.0000      1.00000     0.273785E-02
     STRESS PERIOD TIME     0.267840E+07   44640.0      744.000      31.0000     0.848734E-01
    TOTAL SIMULATION TIME     0.838944E+08 0.139824E+07  23304.0      971.000     2.65845
```

شکل ٤-٧- فایل نهایی خروجی مدل در مرحله ارزیابی

اگرچه عدم اطمینان از حوادث هیدرولوژیکی آینده را می‌توان با در نظر گرفتن سناریوهای بیش‌تر کاهش داد ولی چون این کار مستلزم صرف زمان بیش‌تری می‌باشد بنابراین در این مطالعه فقط سه سناریو مد نظر قرار گرفته است که نتایج مربوطه در جدول (۴-۵) ارائه شده‌اند.

جدول ٤-٥- خلاصه مشخصات مربوط به سه سناریوی پیش‌بینی مدل

ردیف	سناریوهای پیش‌بینی	نفوذ از بارندگی و رودخانه (MCM)	تخلیه (MCM)	زمان نهایی پیش‌بینی
۱	خشکسالی	۳۴/۱	۲۸۵	مهر ۱۳۸۴
۲	ترسالی	۱۳۲/۶	۲۸۵	مهر ۱۳۸۴
۳	عادی	۶۸/۳	۲۸۵	مهر ۱۳۸۴

٤-٥-٧- محدودیت‌های مدل

محدودیت مدل‌سازی در این تحقیق به صورت محدودیت در مدل مفهومی، محدودیت در درجه اعتبار واسنجی و محدودیت در انجام پیش‌بینی‌ها مطرح شده است:

- **محدودیت در مدل مفهومی:** نقشه سنگ کف در منطقه هجین دارای خطای زیاد می‌باشد که در حین مدل‌سازی واسنجی شده است. به نظر می‌رسد در عملیات ژئوفیزیکی به مساله بالا بودن EC توجهی نشده و باید به منظور برطرف کردن این خطا عملیات ژئوفیزیکی دوباره انجام و با اطلاعات چاه‌ها مقایسه شود.

- **محدودیت در درجه اعتبار واسنجی:** ضریب ذخیره متوسط مدل ۵/۸ درصد به‌دست آمده است در حالی که ضریب ذخیره متوسط بیلان ۷ درصد می‌باشد. تغییر ضریب ذخیره در مدل منجر به عدم همخوانی بیلان محاسبه‌ای و بیلان شبیه‌سازی شود.

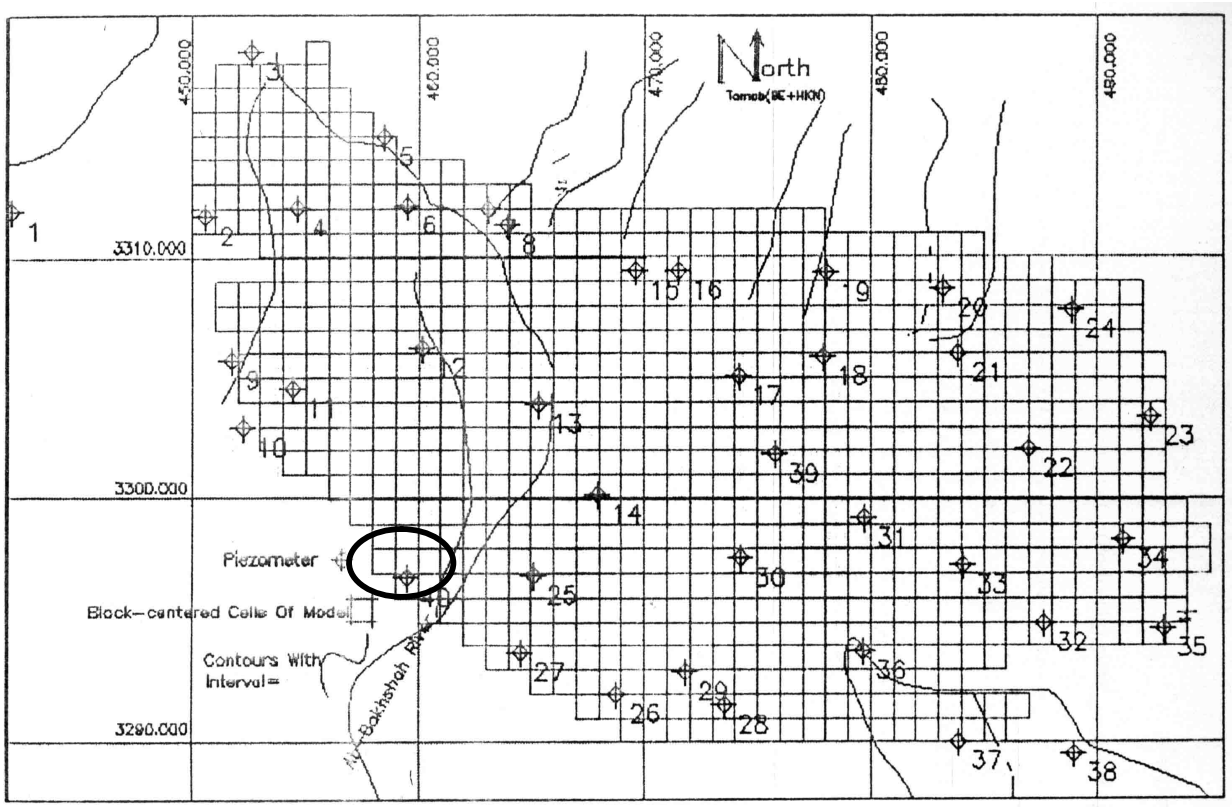
٤-٥-٨- نتیجه گیری و پیشنهادها

الف – شبکه پیزومتری در ورودی رودخانه نامناسب و فاصله بین پیزومترها زیاد می‌باشد که این امر باعث خطا در برآورد پتانسیل آب‌های زیرزمینی منطقه می‌شود. محل مناسب برای حفر پیزومتر در شکل (۴-۸) با شماره ۴۰ نشان داده شده است.

ب – با توجه به کسری مخزن (که توسط بیلان شبیه‌سازی شده نیز تایید شده) پیشنهاد می‌شود بهره‌برداری با دقت بالایی صورت پذیرد و نسبت به تکمیل شبکه پیزومتری و اندازه‌گیری ماهانه سطح آب اقدام شود.

ج – داده‌های مربوط به قابلیت انتقال و آبدهی ویژه با توجه به گسترش زیاد آبخوان کافی نمی‌باشند و نیاز به انجام آزمایش‌های پمپاژ دقیق‌تر و بیش‌تر در منطقه می‌باشد.

د – بهتر است آب‌های سطحی ورودی و خروجی و حجم آب مصرفی در سطح دشت برای هر سال آبی به دقت اندازه‌گیری شود.



شکل ٤-٨- موقعیت پیشنهادی برای حفر پیزومتر شماره ٤٠ (علامت بیضی)

پیوست ۱

پرسشنامه ارزیابی مدل آب زیرزمینی

پرسشنامه ارزیابی مدل آب زیرزمینی

پرسش	امتیاز				جمع امتیاز	توضیح
۱- گزارش	۰	۱	۲	۳		
۱-۱- آیا اهداف پروژه به خوبی در گزارش بیان شده‌اند؟	خیر	اندک	مناسب	بسیار خوب	۲	
۱-۲- آیا بیلان آب (یا جرم) ارائه شده است؟	خیر		بلی		۲	
۱-۳- آیا مدل ارائه شده به اهداف مورد نظر پروژه دست یافته است؟	خیر	تا حدودی	قابل قبول	بسیار خوب	۲	
آیا مدارک و نقشه‌های مربوطه پیوست شده‌اند؟	خیر	ناقص		کامل	۳	
آیا تمام داده‌های مورد استفاده در مدل در دسترس می‌باشند؟	خیر	ناقص		کامل	۱	
آیا با توجه به گزارش ارائه شده امکان بازتولید مدل در آینده وجود دارد؟	خیر		بلی	۲		
آیا افراد تهیه کننده مدل مشخص می‌باشند؟	خیر		بلی		۲	
آیا ساختار گزارش مناسب است؟	خیر	تا حدودی	قابل قبول	عالی	۲	
۱-۴- آیا نتایج مدل جنبه کاربردی دارند؟	خیر	تا حدودی	قابل قبول	کامل	۲	
آیا مطالعه مدل از جنبه اقتصادی مقرون به صرفه بوده است؟	خیر	تا حدودی		بلی	۳	
آیا پیشنهاد های ارائه شده منطقی و بر پایه دلیل مطرح شده‌اند؟	خیر	تا حدودی	بلی		۱	
آیا مدل تهیه شده کلیه موارد راهنما را پوشش داده است؟	خیر	تا حدودی	قابل قبول		۲	

ادامه پرسشنامه ارزیابی مدل آب زیرزمینی

پرسش	امتیاز					جمع امتیاز	توضیح
۲- آنالیز داده‌ها						۱	
آیا دانسته‌های موجود برای یک مدل ریاضی کافی بوده است؟	خیر	تا حدودی	بلی			۱	
آیا ادبیات فنی کاملا مرور شده است؟	خیر	تا حدودی	بلی			۲	
آیا طول دوره زمانی داده‌های مورد استفاده کافی بوده است؟	خیر		بلی				
آیا درستی و قابل اعتماد بودن داده‌ها بررسی شده است؟	خیر	تا حدودی	بلی			۱	
آیا پراکندگی پارامترهای مدل مشخص می‌باشد؟	خیر	تا حدودی	بلی			۱	
آیا پارامترهای مدل مورد آنالیز آماری (میانگین، انحراف معیار، ...) قرار گرفته‌اند؟	خیر	تا حدودی	بلی			۱	
۲-۱- آیا داده‌های آب زیرزمینی جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل			۱	
آیا داده‌های بارندگی جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل			۱	
آیا داده‌های جریان سطحی جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل			۱	
آیا داده‌های سیلاب جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل			۰	
آیا داده‌های آبیاری جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل			۰	
آیا داده‌های مربوط به نوع مصرف آب زیرزمینی جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل			۱	
آیا داده‌های تبخیر و تعرق جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل			۱	
آیا داده‌های زهکشی جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل			۰	

ادامه پرسشنامه ارزیابی مدل آب زیرزمینی

پرسش	امتیاز				جمع امتیاز	توضیح
آیا داده‌های دیگر جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل		۱	
آیا داده‌های تنش های فوق از نظر واکنش آب زیرزمینی به آن ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند؟	خیر	ناقص	کامل		۱	
آیا آنالیز داده‌ای از قلم افتاده است؟	بلی		خیر		۰	
۲–۲– آیا کنتورهای سطح آب و خطوط جریان ارائه شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل		۱	
۲–۳– آیا تمام داده‌های مربوط به تغذیه گردآوری و آنالیز شده‌اند؟ (بارندگی، جریان‌های سطحی، آبیاری، ..)	خیر	ناقص	کامل		۱	
۲–۴– آیا تمام داده‌های مربوط به تخلیه گردآوری و آنالیز شده‌اند؟ (برداشت، تبخیر و تعرق، زهکشی، چشمه‌ها، . . .)	خیر	ناقص	کامل		۱	
۲–۵– آیا آبنمودهای آب زیرزمینی برای واسنجی مورد استفاده قرار گرفته‌اند؟		خیر	ناقص	کامل		۱
آیا آبنمودهای معرف به درستی انتخاب شده‌اند؟	خیر		کامل		۱	
آیا داده‌های مربوط به آبنمودهای آب زیرزمینی در دسترس هستند؟	خیر	ناقص	کامل		۲	
آیا آبنمودهای اندازه‌گیری شده مقایسه و آنالیز شده‌اند؟	خیر	بلی			۱	
آیا داده‌های تراز سطح ایستابی در دسترس هستند؟	خیر	ناقص	کامل		۲	
آیا نقشه‌های کنتوری استفاده شده به درستی انتخاب شده‌اند؟	خیر		بلی		۲	
آیا میان یابی داده‌ها به درستی صورت گرفته است؟	خیر	بلی			۱	
۲–۶– آیا از واحدهای اندازه‌گیری ثابت استفاده شده است؟	خیر	بلی			۱	
آیا از سطوح مبنای استاندارد استفاده شده است؟	خیر	بلی			۱	

ادامه پرسشنامه ارزیابی مدل آب زیرزمینی

پرسش	امتیاز						جمع امتیاز	توضیح
اگر احتمال تاثیر جریان آب زیرزمینی از چگالی وجود داشته باشد، آیا امکان ورود این مساله در شبیه‌سازی پیش‌بینی شده است؟	خیر		بلی				۰	
آیا کلیه داده‌های پایه برای بازتولید مدل در آینده به صورت منسجم بایگانی شده‌اند؟	خیر	ناقص	کامل				۱	
۳- مدل مفهومی								
۳-۱- آیا مدل مفهومی با اهداف مدل و وضعیت منطقه همخوانی دارد؟	خیر	ناقص	کامل				۱	
۳-۲- آیا مدل مفهومی به صورت تصویری ارائه شده است؟	خیر	بلی					۱	
۳-۳- آیا مدل مفهومی گویا و واضح است؟	خیر		بلی				۱	
۳-۴- آیا مدل مفهومی بیش از اندازه ساده یا بیش از اندازه پیچیده می‌باشد؟	بلی	خیر					۱	
۴- طراحی مدل								
آیا مدل ریاضی (تحلیلی، عددی) مورد استفاده به درستی انتخاب شده است؟	خیر		بلی				۲	
آیا تعداد لایه‌های مدل به درستی تعیین شده است؟	خیر		بلی				۱	
۴-۱- آیا محدوده مدل به درستی انتخاب شده است؟	خیر		بلی				۲	
۴-۲- آیا شبکه‌بندی مدل با توجه به تراکم و تغییرات اطلاعات پایه به درستی انجام شده است؟	خیر		بلی				۱	
۴-۲- آیا شرایط مرزی اعمال شده قابل قبول می‌باشند؟	خیر		بلی				۱	
۴-۳- آیا گزینش نرم افزار به کار گرفته شده با توجه به اهداف مدل درست بوده است؟	خیر		بلی				۲	
آیا شبیه‌سازی در شرایط ماندگار انجام شده است؟	خیر	بلی					۱	

ادامه پرسشنامه ارزیابی مدل آب زیرزمینی

پرسش	امتیاز					جمع امتیاز	توضیح
آیا شبیه‌سازی در شرایط ناماندگار انجام شده است؟	خیر	بلی				۱	
آیا انتخاب دوره تنش به درستی صورت گرفته است؟	خیر		بلی			۱	
آیا انتخاب گام های زمانی در دوره های تنش به درستی صورت گرفته است؟	خیر		بلی			۱	
آیا جهت گیری شبکه مدل با وضعیت مرزهای آن همخوانی دارد؟	خیر	بلی				۱	
آیا شرایط اولیه به درستی انتخاب شده‌اند؟	خیر		بلی			۲	
آیا بیلان شبکه‌های مدل کنترل شده است؟	خیر		بلی			۲	
۵- واسنجی							
آیا داده‌های مکانی کافی برای واسنجی موجود بوده است؟	خیر	بلی				۰	
آیا داده‌های زمانی کافی برای واسنجی موجود بوده است؟	خیر	بلی				۰	
آیا مشخص است که واسنجی از نوع خودکار و یا سعی و خطا می‌باشد؟	خیر	بلی				۱	
۵-۱- آیا مدل با توجه به داده‌های مکانی به خوبی واسنجی شده است؟	خیر		بلی			۱	
۵-۲- آیا مدل با توجه به داده‌های زمانی به خوبی واسنجی شده است؟	خیر		بلی			۱	
آیا مدل به صورت موضعی از واسنجی مناسب یا نامناسب برخوردار است؟	بلی		خیر			۱	
آیا برای واسنجی مدل از داده‌های مربوط به رژیم های هیدرولوژیکی گوناگون استفاده شده است؟	خیر	بلی				۰	
۵-۳- آیا پراکندگی و مقدار پارامترهای واسنجی مناسب است؟	خیر	بلی				۰	

ادامه پرسشنامه ارزیابی مدل آب زیرزمینی

پرسش			امتیاز		جمع امتیاز	توضیح
۶- ارزیابی مدل						
آیا بخشی از داده‌ها به صورت جداگانه برای ارزیابی مدل در نظر گرفته شده است؟	خیر		بلی		۲	
آیا میزان داده‌های در نظر گرفته شده برای ارزیابی مدل مناسب می‌باشد؟	خیر	بلی			۱	
آیا مدل در مرحله ارزیابی مناسب تشخیص داده شده است؟	خیر			بلی		
۶-۱- در صورتی که مدل در مرحله ارزیابی رضایت بخش تشخیص داده نشده، آیا دلایل کافی برای این امر وجود دارد؟	خیر		بلی		۲	
آیا مدل به صورت موضعی از ارزیابی مناسب یا نامناسب برخوردار است؟	بلی	خیر			۱	
۷- پیش‌بینی						
آیا پیش‌بینی برای شرایط ماندگار صورت گرفته است؟	خیر		بلی		۲	
آیا پیش‌بینی برای شرایط ناماندگار صورت گرفته است؟	خیر		بلی		۰	
آیا تنش ها درست فرض شده‌اند؟	خیر	بلی			۱	
آیا افق زمانی در نظر گرفته شده برای پیش‌بینی قابل مقایسه با طول دوره های واسنجی و ارزیابی می‌باشد؟	خیر		بلی		۲	
آیا پیش‌بینی‌های ارائه شده با چارچوب های مکانی و زمانی مدل همخوانی دارند؟	خیر		بلی		۱	
۷-۱- آیا سناریوهای مختلف برای تغییرات احتمالی در اقلیم پیش‌بینی شده است؟	خیر	بلی			۱	
۷-۲- آیا سناریوهای مختلف برای گزینه‌های مختلف اجرایی/مدیریتی پیش‌بینی شده است؟	خیر		بلی		۰	
آیا احتمال متاثر بودن پیش‌بینی‌ها از شرایط مرزی آینده وجود دارد؟	بلی	خیر			۰	

ادامه پرسشنامه ارزیابی مدل آب زیرزمینی

پرسش	امتیاز					جمع امتیاز	توضیح
در صورت تاثیر گذاری شرایط مرزی آینده، آیا پیش‌بینی‌ها معتبر خواهند ماند؟	خیر	بلی				۰	
آیا پیش‌بینی‌های ارائه شده منطقی می‌باشند؟	خیر	بلی				۱	
۸- آنالیز حساسیت							
۸-۱- آیا آنالیز حساسیت از کیفیت لازم برای آنالیز پارامترهای مهم برخوردار می‌باشد؟	خیر		بلی			۰	
۸-۲- آیا از نتایج آنالیز حساسیت برای کنترل دقت واسنجی مدل استفاده شده است؟	خیر		بلی			۱	
۸-۳- آیا از نتایج آنالیز حساسیت برای کنترل دقت پیش‌بینی مدل استفاده شده است؟	خیر		بلی			۰	
آیا حساسیت مدل به صورت تصویری نمایش داده شده است؟	خیر	بلی				۱	
آیا حساسیت ها به چهار نوع یک تا چهار تقسیم‌بندی شده‌اند؟	خیر	بلی				۰	
آیا حساسیت نوع چهار در مدل تشخیص داده شده است؟	بلی	خیر					
آیا نتایج آنالیز حساسیت برای تعیین درستی واسنجی به کارفته‌اند؟	خیر	بلی				۰	
آیا نتایج آنالیز حساسیت برای تعیین درستی پیش‌بینی‌های مدل به کارفته‌اند؟	خیر	بلی				۰	
۹- آنالیز عدم قطعیت							
آیا عدم قطعیت در ویژگی‌های آبخوان تنها تایید شده یا به صورت توصیفی یا کمی‌ارائه شده است؟	تنها تایید	توصیفی	کمی			۰	
آیا عدم قطعیت در داده‌های دوره تنش تنها تایید شده یا به صورت توصیفی یا کمی‌ارائه شده است؟	تنها تایید	توصیفی	کمی			۰	
آیا عدم قطعیت در داده‌های مشاهده‌ای تنها تایید شده یا به صورت توصیفی یا کمی‌ارائه شده است؟	تنها تایید	توصیفی	کمی			۰	

ادامه پرسشنامه ارزیابی مدل آب زیرزمینی

پرسش	امتیاز				جمع امتیاز	توضیح
آیا عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها تنها تایید شده یا به صورت توصیفی یا کمی‌ارائه شده است؟	تنها تایید	توصیفی		کمی	۰	
آیا روش انتخاب شده برای آنالیز عدم قطعیت به درستی انتخاب شده است؟	خیر			بلی	۰	

پیوست ۲

واژه‌نامه

پ.۲-۱- واژه نامه

آبخوان	Aquifer
آبخوان آزاد	Unconfined aquifer
آبخوان محبوس	Confined aquifer
آلودگی	Pollution, Contamination
آب‌شویی	Leaching
آلودگی غیرمتمرکز	Non point source pollution
آلودگی متمرکز	Point source pollution
ابرتابع	Functional
اجزای محدود	Finite element
ارزیابی، تطبیق با واقعیت	Verification
استرس، تنش	Stress
اصلاح کردن	Revise
آنالیز حساسیت	Sensivity analysis
آنالیز عدم قطعیت	Uncertainty analysis
انتقال (مواد محلول)	Advection
اندرکنش	Interaction
بار هیدرولیکی	Hydraulic head
بارهیدرولیکی ثابت	Fixed –head
بازه	Reach
برون‌یابی	Extrapolation
پاسخ	Response
پخشیدگی	Dispersion
پراکنش نگار	Scatter plot
پیچیدگی	Complexity
پیش‌بینی	Prediction
پیکربندی	Configuration
پهنه	Zone
تخلیه	Discharge
تداخل (آب‌شور و شیرین)	Intrusion

Correlation	تطبیق
Recharge	تغذیه
Finite difference	تفاضل محدود
Radial flow	جریان شعاعی
Steady state	حالت ماندگار
Unsteady state	حالت غیرماندگار
Element	جز، المان
Sink	چاه (فروکش)چاهک
Multi-layer well	چاه چند لایه‌ای
Density	چگالی
Granular	دانه‌ای
Interpolation	درون‌یابی, میان‌یابی
Period	دوره
Stress period	دوره تنش
Graphical user interface	رابط گرافیکی
Particle tracking method	روش تعقیب ذرات
Method of Characteristics	روش خطوط مشخصه
Modified Method of Characteristics	روش اصلاح شده خطوط مشخصه
Hybrid Method of Characteristics	روش ترکیبی خطوط مشخصه
Random Walk Method	روش گام‌های تصادفی
Geostatistics	زمین آماری
Matrix	زمینه
Drain	زهکش
Drainage	زهکشی
Simplification	ساده‌سازی
Consistent	سازگار
Water table	سطح ایستابی
Cell	سلول
Flux	شار، جریان در واحد سطح، جریان
Grid=mesh	شبکه

Block centered grid	شبکه بلوک مرکز
Mesh centered grid	شبکه گره مرکز
Irregular grid	شبکه نامنظم
Quasi three dimensional	شبه سه‌بعدی
Simulation	شبیه‌سازی
Initial conditions	شرایط اولیه
Boundary conditions	شرایط مرزی
Storage coefficient	ضریب ذخیره
Transmissivity= Transmissibility	ضریب قابلیت انتقال
Hydraulic conductivity	ضریب هدایت هیدرولیکی
Peclet number	عدد پکلت
Scale factor	فاکتور مقیاس
Conductance	فاکتور هدایت
Segment	قطعه
Code	کد، برنامه کامپیوتری
Kriging	کریگینگ
Time step	گام‌زمانی
Compilation	گردآوری ـ تلفیق
Node	گره
Module	مادول، زیربرنامه
Steady	ماندگار (جریان)
Axi-symmetric	متقارن محوری
Vicinity	مجاورت ـ همسایگی
Septic tank	مخزن جمع‌آوری فاضلاب
Black box model	مدل جعبه سیاه
Conceptual model	مدل مفهومی
Water balance modeling	مدل‌سازی بیلا ن آب
Georeference	مرجع زمینی
No flow boundary	مرز بدون جریان
Conventional	مرسوم ـ رایج

Composite	مرکب
Source	منبع – چشمه
Unsaturated Zone	منطقه غیراشباع
Transient	ناماندگار (جریان)
Anisotrope	ناهمسان
Heterogeneous	ناهمگن
Pumping rate	نرخ پمپاژ
Injection rate	نرخ تزریق
Aspect ratio	نسبت سیما
Indicator	نشانه
Leakage	نشت
Infiltration	نفوذ
Partial penetration	نفوذ جزیی
Penetrate	نفوذ کردن
Performance	نمایش ـ اجرا
Log	نمودار چاه
Stream	نهر(رودخانه کوچک)
Hydrostratigraphic unit	واحد آب ـ چینه‌ای (هیدرواستراتیگرافیک)
Calibration	واسنجی
Seepage face	رویه تراوش
Target	هدف
Isotrope	همسان
Homogeneous	همگن

منابع و مراجع

۱- مرکز تحقیقات منابع آب، ۱۳۷۹، بررسی منابع آب، بیلان و مدل ریاضی محدوده مطالعاتی بردسیر با استفاده از مدل MODFLOW، مرکز تحقیقات منابع آب

۲- میراب‌زاده اردکانی، مهدی، ۱۳۷۶، مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی، دانشگاه تهران، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی

۳- ناصری، حمیدرضا، ۱۳۸۱، مدل‌های آب‌های زیرزمینی، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین

۴- ناصری، حمیدرضا و کوهستان نجفی، حمیدرضا، ۱۳۸۰، شبیه‌سازی مولفه‌های بیلان آب زیرزمینی و تعیین نرخ نفوذ به آبخوان دشت زنجان، پروژه تحقیقاتی، وزارت نیرو، سازمان مدیریت منابع آب ایران، دفتر تحقیقات کاربردی و تکنولوژی ساخت

۵- خلقی، مجید، ۱۳۸۰، مدل‌های ریاضی جریان آب‌های زیرزمینی، ۷۲ صفحه، مجموعه ارائه شده در کارگاه آموزشی – تخصصی مدل‌های ریاضی جریان آب زیرزمینی از تئوری تا کاربرد

۶- خلقی، مجید، ۱۳۸۲، مدل‌های ریاضی در آلودگی آب‌های زیرزمینی،۱۱۲ صفحه، مجموعه ارائه شده در کارگاه آموزشی – تخصصی مدل‌های ریاضی در آلودگی آب‌های زیرزمینی از تئوری تا کاربرد

1- Anderson M. P. W. W. Woessner 1992 Applied groundwater modelling simulation of flow and advective transport; Academic Press 381 P

2- ASTM 1996 Standard guide for sub-surface flow and transport modeling D 5880 The American Society for Testing and Materials

3- ASTM 1997 Standard guide for developing and evaluating groundwater modeling codes D 6025 The American Society for Testing and Materials

4- ASTM 1995 Standard guide for conducting a sensitivity analysis for a groundwater flow model application D 5611 The American Society for Testing and Materials

5- ASTM 1995 Standard guide for defining initial conditions in groundwater flow modeling D5610 The American Society for Testing and Materials

6- ASTM 1994 Standard guide for comparing groundwater flow model simulations fo site – specific information D5490 The American Society for Testing and Materials

7- ASTM 1997 Standard guide for calibrating a groundwaterflow model application D5981 The American Society for Testing and Materials

8- ASTM 1997 Standard guide for describing the functionality of a groundwater modeling code D6033 The American Society for Testing and Materials

9- ASTM 1998 Standard guide for documenting a ground water modeling code D 6171 The American Society for Testing and Materials

10- Bredhoeff F. and Phill H. 1995 Groundwater Models Groundwater vol.33 no.4 pp.530-531

11- Chiang W. H and W. Kinzelbach 1998 Processing Modflow a simulation system for modeling groundwater flow and pollution

12- Chiang & Kinzelbach 2001 3D groundwater modeling with PMWIN Springer 346 P

13- Domenico P. A. 1972 Concepts and Models in Groundwater Hydrology Mc-Graw Hill New York 405 P.

14- Middlemis H. 2000 Groundwater flow modeling guideline Murray-Darling Basin Commission Australia

15- Pricket T. A. 1975 "Modeling Techniques for Groundwater Evaluation" in Advances in hydroscience vol. 10 ed. V. T. Chow 1-143 New York Academic Press.
16- Spitz K. & J. Moreno 1996 A practical guide to groundwater and solute transport modelling John Wiley 472p
17- U. S. Army Corps of engineering 1999 Engineering and design Groundwater hydrology
18- Zheng C. G. D. Bennett 1995 Applied contaminant transport modelling theory and practice Van Nostrand Reinhold 440p
19- Zeng C. 1990 MT3D A modular three dimentional transport model for simulation of advection dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater system S. S. Papadopulos & Associates 162 P.
20- Anderson and Woessner(1992). Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport; Academic Press 381P.
21- ASTM (1997)- Standard guide for calibrating a groundwater model application- D5981.
22- ASTM (1986). Standard guide for sub-surface flow and transport modeling D5880.
23- ASTM (1985)- Standard guide for application of a solute transport model to a site- specific groundwater pollution.
24- Chiang and Kinzelbach (2001)- 3D groundwater modeling with PMWIN springer 346P.
25- Chiang and Kinzelbach (1998) Processing modflow a simulation System for modeling groundwater flow and pollution.
26- Kimzelbach W (1996) Groundwater Modelling Elsevier Pub. PP 333.
27- Middlemis H. (2000). Groundwater flow modeling guideline Murray. Darling basin Commission Australia
28- Zheng and Bennet (1995). Applied Contaminant Transport Van Nostrand Reinhold 440P.