

فصل اول: مقدمه و کلیات تحقیق

۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- تعریف آب‌های زیرزمینی
۳	۱-۲-۱- واحدهای آبچینه‌ای
۳	۳-۱- آب زیرزمینی در چرخه هیدرولوژی
۶	۴-۱- قوانین هیدرولیکی حاکم بر جریان آب زیرزمینی
۶	۱-۴-۱- قانون داریسی
۶	۲-۴-۱- معادله عمومی حاکم بر جریان آب زیرزمینی
۸	۳-۴-۱- معادله پواسون در آب‌های زیرزمینی
۹	۴-۴-۱- معادله آب‌های زیرزمینی در حالت ناپایدار
۹	۵-۱- مقدمه‌ای بر مدل‌های جریان آب زیرزمینی
۱۰	۱-۵-۱- مدل‌های فیزیکی
۱۰	۲-۵-۱- مدل‌های آنالوگ
۱۰	۱-۲-۵-۱- مدل‌های الکتریکی
۱۱	۲-۲-۵-۱- مدل هله - شاو
۱۱	۳-۲-۵-۱- مدل جعبه شنی
۱۱	۳-۵-۱- مدل‌های ریاضی
۱۴	۱-۳-۵-۱- روش تفاضلات محدود
۱۵	۲-۳-۵-۱- روش المان‌های محدود
۱۶	۶-۱- حل معادلات حاصل از روش‌های عددی
۱۷	۷-۱- مراحل طراحی یک مدل جریان آب زیرزمینی

صفحه	عنوان
۱۷	۱-۷-۱- تهیه مدل مفهومی.....
۱۸	۲-۷-۱- انتخاب کد کامپیوتری و نرم افزار مناسب.....
۱۹	۳-۷-۱- معیارهای انتخاب مدل مناسب.....
۲۰	۴-۷-۱- راه اندازی مدل.....
۲۰	۵-۷-۱- طراحی شبکه مدل.....
۲۱	۶-۷-۱- تشکیل چارچوب فیزیکی.....
۲۲	۷-۷-۱- انتخاب استرس پر یودها و گام های زمانی.....
۲۳	۸-۷-۱- تعیین چاه های مشاهده ای محدوده مدل سازی.....
۲۳	۹-۷-۱- تعیین شرایط مرزی برای آبخوان.....
۲۳	۱۰-۷-۱- شرایط اولیه.....
۲۴	۱۱-۷-۱- تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی سفره.....
۲۴	۱۲-۷-۱- مشخص کردن تنش های عمل کننده بر سیستم.....
۲۵	۱۳-۷-۱- اجرای مدل.....
۲۵	۱۴-۷-۱- آنالیز حساسیت و واسنجی مدل.....
۲۶	۱-۱۴-۷-۱- روش سعی و خطا.....
۲۷	۲-۱۴-۷-۱- واسنجی خودکار.....
۲۷	۱۵-۷-۱- مدل های موجود در واسنجی خودکار.....
۲۹	۱۶-۷-۱- صحت سنجی مدل.....
۲۹	۱۷-۷-۱- پیش بینی.....
۲۹	۸-۱- اطلاعات مورد نیاز جهت شبیه سازی جریان در آبخوان ها با استفاده از مدل ریاضی.....
۳۰	۹-۱- مروری بر نرم افزارهای مدل سازی آب زیرزمینی.....

صفحه	عنوان
۳۱	MODFLOW-۱-۹-۱
۳۱	Groundwater vistas-۲-۹-۱
۳۱	Groundwater modeling system-۳-۹-۱
۳۱	Finite element flow -۴-۹-۱
۳۲	SUTRA-۵-۹-۱
۳۲	MT3D-۶-۹-۱
۳۲	SWIT-۷-۹-۱
۳۲	VERA-۸-۹-۱
فصل دوم: پیشینه تحقیق	
۳۴	۱-۲- سابقه تحقیق
۳۵	۱-۱-۲- مطالعات انجام شده در داخل کشور
۳۹	۲-۱-۲- مطالعات انجام گرفته در خارج کشور
فصل سوم: مواد و روش‌ها	
۵۳	۱-۳- محدوده مطالعاتی: آبخوان دشت مروست
۵۳	۱-۱-۳- سیمای عمومی دشت مروست
۵۴	۱-۲-۳- زمین‌شناسی
۵۶	۲-۳- هیدروژئولوژی
۵۶	۱-۲-۳- حدود گسترش و نوع آبخوان
۵۶	۲-۲-۳- ضخامت رسوبات آبرفتی
۵۸	۳-۲-۳- دانه‌بندی آبرفت
۵۸	۴-۲-۳- جنس و عمق سنگ کف
۶۰	۳-۳- خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان مروست

صفحه	عنوان
۶۰	۱-۳-۳- ضریب قابلیت انتقال
۶۱	۲-۳-۳- ضریب ذخیره
۶۲	۴-۳- بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی
۶۵	۵-۳- عوامل تغذیه و تخلیه کننده آبخوان
۶۵	۱-۵-۳- عوامل تغذیه
۶۵	۲-۵-۳- عوامل تخلیه کننده
۶۶	۶-۳- بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی
۶۷	۷-۳- پروتکل مدل‌سازی
۶۷	۱-۷-۳- تعیین هدف
۶۹	۲-۷-۳- تهیه مدل مفهومی
۷۰	۳-۷-۳- انتخاب کد کامپیوتری
۷۰	۴-۷-۳- ساخت مدل ریاضی
۷۱	۱-۴-۷-۳- شبکه‌بندی مدل
۷۳	۲-۴-۷-۳- تعیین شرایط مرزی آبخوان
۷۴	۳-۴-۷-۳- بخش تحتانی و فوقانی آبخوان
۷۵	۴-۴-۷-۳- شرایط اولیه و گام‌های زمانی
۷۵	۵-۴-۷-۳- پارامترهای هیدرودینامیکی سفره
۷۶	۶-۴-۷-۳- تنش‌های هیدرولیکی
۷۶	۱-۶-۴-۷-۳- تخلیه آب زیرزمینی ناشی از چاه‌های بهره‌برداری
۷۷	۲-۶-۴-۷-۳- تخلیه ناشی از تبخیر از سطح آب زیرزمینی
۷۷	۳-۶-۴-۷-۳- تغذیه ناشی از آب برگشتی چاه‌های کشاورزی
۷۷	۴-۶-۴-۷-۳- تخلیه و تغذیه زیرزمینی

صفحه	عنوان
۷۷	۳-۷-۴-۷- محاسبه‌گرها
۷۹	۳-۷-۴-۸- اجرای مدل
۸۰	۳-۸- کاربرد GIS در مراحل ساخت مدل
فصل چهارم: نتایج و بحث	
۸۳	۴-۱- واسنجی مدل
۸۴	۴-۱-۱- آنالیز حساسیت
۸۵	۴-۱-۲- واسنجی خودکار
۸۸	۴-۱-۲-۱- کد کامپیوتری PEST
۸۹	۴-۱-۳- واسنجی مدل در شرایط ماندگار
۹۱	۴-۱-۴- واسنجی مدل در شرایط غیر ماندگار
۱۰۰	۴-۲- تصدیق مدل
۱۰۷	۴-۳- محاسبه بیلان آب زیرزمینی منطقه در سال آبی ۸۱-۸۲
۱۱۰	۴-۴- کاهش یا افزایش منابع آب زیرزمینی
۱۱۰	۴-۵- افت سطح ایستابی آبخوان مروست
۱۱۳	۴-۶- ارزیابی عملکرد طرح تغذیه مصنوعی
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	
۱۱۷	۵-۱- نتیجه‌گیری
۱۱۹	۵-۲- پیشنهادات
فصل ششم: فهرست منابع	
۱۲۱	منابع فارسی
۱۲۳	منابع لاتین

صفحه	عنوان
۶۲.....	جدول ۳-۱- نتایج حاصل از حفاری‌های اکتشافی دشت مروست
۶۴.....	جدول ۳-۲- مشخصات چاه‌های پیزومتری محدوده مدل‌سازی.....
۹۰.....	جدول ۴-۱- نتایج واسنجی مدل در حالت ماندگار با ۱۷ پیزومتر
۱۰۲.....	جدول ۴-۲- نتایج حاصل از مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در مهرماه ۸۲.....
۱۰۳.....	جدول ۴-۳- نتایج حاصل از مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در آبان‌ماه ۸۲.....
۱۰۴.....	جدول ۴-۴- نتایج حاصل از مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در آذرماه ۸۲.....
۱۰۸.....	جدول ۴-۵- مقادیر مقادیر کل تغذیه سفره بر حسب مترمکعب در ماه (۸۱-۸۲).....
۱۰۹.....	جدول ۴-۶- مقادیر کل تغذیه سفره و بیلان بر حسب مترمکعب در ماه (۸۱-۸۲).....

صفحه	عنوان
۵	شکل ۱-۱- بیلان جهانی هیدرولوژی
۷	شکل ۲-۱- یک المان فرضی
۱۴	شکل ۳-۱- تصویر شماتیک روش تفاضلات محدود
۱۵	شکل ۴-۱- شمای روش تفاضلات محدود
۱۵	شکل ۵-۱- شمای روش المان‌های محدود
۵۵	شکل ۱-۳- نقشه زمین‌شناسی دشت مروست
۵۷	شکل ۲-۳- نقشه هم‌ضخامت رسوبات آبرفتی
۵۹	شکل ۳-۳- نقشه تراز سنگ کف دشت
۵۹	شکل ۴-۳- نقشه توپوگرافی دشت مروست
۶۱	شکل ۵-۳- نقشه هم‌قابلیت انتقال محدوده مورد مطالعه
۶۳	شکل ۶-۳- چاه‌های مشاهده‌ای محدوده مرست
۶۶	شکل ۷-۳- چاه‌های بهره‌برداری محدوده مروست
۶۸	شکل ۸-۳- پروتکل مدل‌سازی
۷۲	شکل ۹-۳- موقعیت چاه‌های مشاهداتی و پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری
۸۱	شکل ۱۰-۳- روند تلفیق سیستم GIS با مدل‌سازی آبخوان مروست
۸۴	شکل ۱-۴- نتایج آنالیز حساسیت عوامل هدایت هیدرولیکی و تغذیه و تخلیه
۹۱	شکل ۲-۴- همبستگی مقادیر ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در ماه تعادل
۹۲	شکل ۳-۴- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۱)
۹۲	شکل ۴-۴- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۲)

- شکل ۴-۵- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۳)..... ۹۳
- شکل ۴-۶- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۴)..... ۹۳
- شکل ۴-۷- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۵)..... ۹۴
- شکل ۴-۸- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۶)..... ۹۴
- شکل ۴-۹- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۷)..... ۹۵
- شکل ۴-۱۰- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۸)..... ۹۵
- شکل ۴-۱۱- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۹)..... ۹۶
- شکل ۴-۱۲- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۱۰).... ۹۶
- شکل ۴-۱۳- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۱۱).... ۹۷
- شکل ۴-۱۴- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۱۲).... ۹۷
- شکل ۴-۱۵- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۱۳).... ۹۸
- شکل ۴-۱۶- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۱۴).... ۹۸
- شکل ۴-۱۷- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۱۵).... ۹۹
- شکل ۴-۱۸- ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی در چاه مشاهده‌ای شماره (۱۶).... ۹۹
- شکل ۴-۱۹- همبستگی بین بار آبی مشاهداتی و محاسباتی در انتهای استرس پرپود چهارم. ۱۰۰
- شکل ۴-۲۰- همبستگی بین بار آبی مشاهداتی و محاسباتی در انتهای دوره تصدیق مدل ۱۰۱
- شکل ۴-۲۱- منحنی هم‌تراز سطح ایستابی در آبان ۸۱..... ۱۰۵
- شکل ۴-۲۲- منحنی هم‌تراز سطح ایستابی در بهمن ۸۱ ۱۰۵
- شکل ۴-۲۳- منحنی هم‌تراز سطح ایستابی در اردیبهشت ۸۲ ۱۰۶

صفحه	عنوان
۱۰۶.....	شکل ۴-۲۴- منحنی هم‌تراز سطح ایستابی در مرداد ۸۲.....
۱۱۰.....	شکل ۴-۲۵- مقادیر تخلیه و تغذیه سفره آب زیرزمینی در سال ۸۱-۸۲.....
۱۱۲.....	شکل ۴-۲۶- نقشه هم‌افت سطح ایستابی (بر حسب متر) از مهرماه ۱۳۸۱ تا شهریور ۱۳۸۲.....
۱۱۲.....	شکل ۴-۲۷- هیدروگراف سطح آب مشاهداتی پیژومتر ۱۶ در دوره مدل‌سازی.....

فصل اول:

مقدمه و کلیات تحقیق

آب همچون هوایی که تنفس می‌کنیم عنصر اصلی حیات روی کره زمین است. آب برای بسیاری از جنبه‌های توسعه، اقتصادی و اجتماعی، مصارف کشاورزی، شهری و صنعتی و تولید برق آبی ضروری و مولفه‌ی مهمی از محیط زیست محسوب می‌شود و در حال حاضر به عنوان یکی از با ارزش‌ترین منابع طبیعی؛ اصلی‌ترین و مهم‌ترین مسئله و چالش در قرن بیست و یکم خواهد بود. امروزه کشورها بیش از پیش دریافته‌اند که توسعه از جمله توسعه منابع آب باید پایدار باشد. توسعه پایدار به این مفهوم است که منابع طبیعی به نحوی مدیریت و حفاظت شوند که نیازهای حال و نسل‌های آینده را حفظ کنند.

امروزه با رشد سریع جمعیت جهان در ۲۰ سال اخیر، توسعه مناطق کشاورزی و محدودیت منابع آب‌های سطحی نگاه‌ها به سوی منابع آب زیرزمینی به عنوان یک منبع حیاتی آب شیرین بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک سوق یافته است.

۱-۲- تعریف آب‌های زیرزمینی

آب زیرزمینی یا آب زیرسطحی عبارتی است برای تمام آب‌هایی که در زیر سطح زمین یافت می‌شود. با این حال هیدرولوژیست‌های متخصص در آب زیرزمینی اغلب عبارت آب زیرزمینی را برای آب‌هایی که فقط در منطقه اشباع وجود دارد، اطلاق می‌کنند [۲۸].

۱-۲-۱- واحدهای آبچینه ای

۱- آکیفر^۱: Todd (۱۹۵۹) عنوان می‌کند که اصطلاح آکیوفر (آبخوان) با منشأ لاتین، از دو قسمت (aqui) از کلمه aqua به معنی آب و fer از لغت fere به معنی جمع شدن^۲ تشکیل شده است. بنابراین یک آکیوفر اصطلاحی است برای تشکیلات زمین شناسی متخلخلی که :

- آب در آنها به صورت اشباع وجود داشته باشد (یعنی تمام منافذ با آب پر شده باشند).
- اجازه حرکت آب تحت شرایط عادی را داشته باشد.

۲- آکیتارد^۳: به تشکیلاتی که آب را در مقایسه با آکیوفر خیلی کم انتقال می‌دهند، گفته می‌شود. این اصطلاح به تشکیلات زمین‌شناسی نیمه نفوذپذیری اطلاق می‌شود که:

- دارای ضخامت کمتر نسبت به آکیوفری هستند که در زیر یا بالای آن قرار گرفته‌اند.
- قابلیت نفوذپذیری خیلی کمی در مقایسه با یک آکیوفر دارند.
- در سطح وسیعی به صورت افقی گسترش دارند.

۳- آکیفوژ^۴: این عبارت به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد و شامل تشکیلاتی است که نفوذ ناپذیرند (مانند گرانیت خرد نشده) و لذا توانایی ذخیره و انتقال آب را ندارند [۲۸].

۱-۳- آب زیرزمینی در چرخه‌ی هیدرولوژی

تقریباً $1/386 \times 10^9 \text{ km}^3$ آب روی کره زمین وجود دارد که از این مقدار 10^9 km^3 یا $1/338$ یا $96/6\%$ آن در اقیانوس‌ها یافت می‌شود. از 35% باقیمانده، $1/7\%$ آن در زیر زمین و به

^۱ Aquifer

^۲ To bear

^۳ Aquitard

^۴ Aquifuge

شکل آب زیرزمینی (تقریباً ۴۵٪ این مقدار، آب شیرین و بقیه شور است) و ۰/۰۶٪ باقیمانده شامل آب موجود در دریاچه‌ها، رودخانه، بیوماس و اتمسفر می‌باشد. واضح است که اقیانوس‌ها از نظر حجم آب ذخیره شده و آب‌های زیرزمینی از نظر مقدار آب شیرین ذخیره شده بر دیگر سیستم‌های آبی غلبه دارند.

آب در سیستم‌های متفاوت آبی و در حالات مختلف به طور دائم در حال حرکت و البته تغییر شکل از یک جزء^۱ به جزئی دیگر می‌باشد. این حرکت و تغییر شکل مداوم، چرخه هیدرولوژی^۲ یا چرخه آبی^۳ خوانده می‌شود. می‌توان نمایش ساده‌ای از این چرخه را به شکل هندسی و با در نظر گرفتن اجزای مختلف؛ به عنوان مخازن ذخیره نشان داد که هر کدام از این مخازن دارای حجم مشخصی از آب می‌باشند. از این حجم به عنوان موجودی اولیه^۴ یاد می‌شود. بین این مخازن مرتباً آب رد و بدل می‌گردد که معمولاً به آن جریان یا سیال^۵ گفته می‌شود. شکل (۱-۱) چرخه هیدرولوژی و بیلان جهانی را به صورت هندسی نمایش می‌دهد [۶۰].

بر اساس شکل نشان داده شده می‌توان زمان ماند^۶ را برای اجزای چرخه هیدرولوژی محاسبه کرد. زمان ماند به عنوان نسبی از حجم کل داخل مخزن به شدت جریان خروجی از مخزن تعریف می‌شود. در واقع این زمان نشان می‌دهد که چه مدت طول می‌کشد تا آب موجود در یک مولفه‌ی خاص از چرخه هیدرولوژی ساکن می‌ماند تا به سمت یک مخزن خاص حرکت کند. اعداد نشان داده شده روی فلش‌ها در شکل (۱-۱) شدت جریان برحسب کیلومتر مکعب در سال و مقادیر داخل پرانتزها نشان دهنده حجم برحسب کیلومتر مکعب هستند. با توجه به شکل این زمان برای رودخانه به این صورت محاسبه می‌شود [۶۰]:

^۱Component

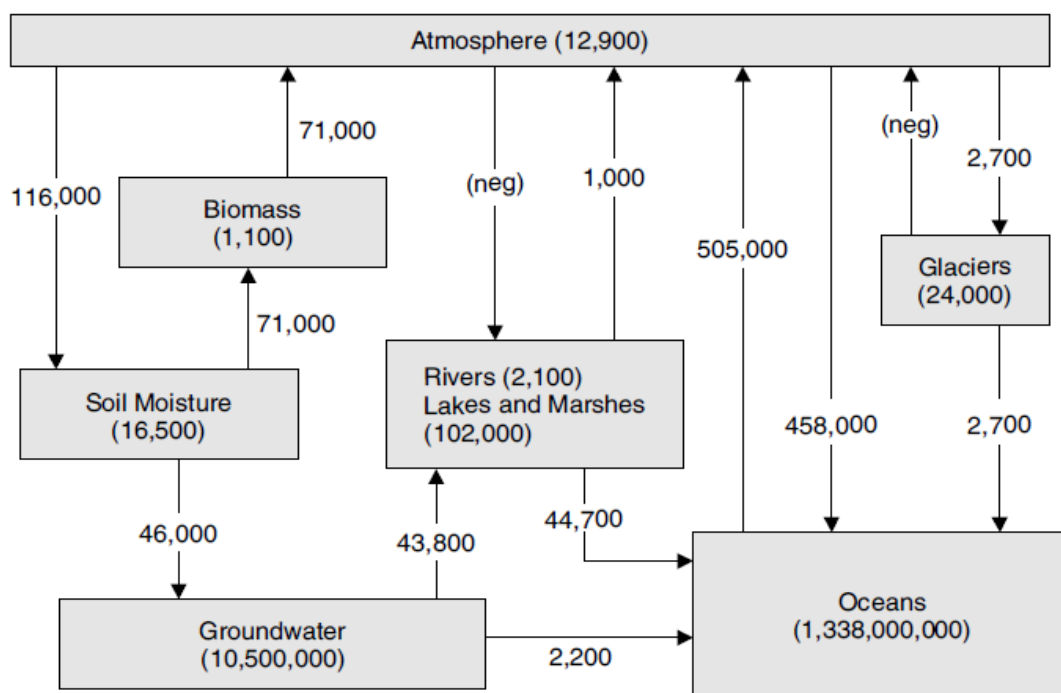
^۲Hydrological cycle

^۳Water cycle

^۴Stock

^۵Flow

^۶Residence time



شکل (۱-۱): چرخه جهانی هیدرولوژی [۶۰]

$$(2100\text{Km}^3 \div 44700\text{km}^3 / \text{yr}) = 0.047\text{year} = 17\text{day}$$

اما زمان ماند برای آب زیرزمینی:

$$(10500000\text{km}^3 \div 46000\text{km}^3 / \text{yr}) = 229\text{year}$$

بنابراین هنگامی که آب وارد سیستم آب زیرزمینی می شود برای مدت طولانی در آن جا می ماند.

این تفاوت های بازر در زمان ماند برای هر کدام از اجزای چرخه هیدرولوژی، ویژگی خاصی به هر سیستم آبی می بخشد. برای مثال آلودگی، در سیستم های رودخانه ای خیلی سریع منتقل و از آن سیستم خارج می گردد اما در آب زیرزمینی به علت سرعت خیلی کم، مدت زمان زیادی طول می کشد تا آلودگی از مکانی به مکان دیگر منتقل شود اما همانطور که پخشیدگی آلودگی به آرامی صورت می گیرد، زمان زیادی نیز برای تصفیه آلودگی زیرزمینی لازم است. بنابراین همانطور که آب زیرزمینی با آب سطحی بهم مرتبط هستند، از جهات زیادی نیز با هم تفاوت دارند [۶۰].

۴-۱- قوانین هیدرولیکی حاکم بر جریان آب زیرزمینی

۴-۱-۱- قانون دارسی

دارسی (Darcy) یک مهندس فرانسوی بود که در سال ۱۸۵۶ جهت طراحی یک فیلتر شنی یک سری آزمایش انجام داد. آزمایشات وی منجر به رابطه‌ای تجربی گردید که تحول بزرگی را در مطالعه آب‌های زیرزمینی بوجود آورد.

نرخ جریان آب بین دو نقطه در محیط متخلخل با توجه به رابطه دارسی این گونه محاسبه می‌شود [۳۵]:

(۱-۱)

$$q_i = -K \frac{\partial h}{\partial x}$$

q_i دبی مخصوص (LT^{-1})

K ضریب هدایت هیدرولیکی (LT^{-1})

h بار هیدرولیکی (L)

۴-۱-۲- معادله‌ی عمومی حاکم بر جریان آب زیرزمینی

برای اینکه بتوان معادلات پایه را در یک سیستم آبخوان تشکیل داد، ابتدا یک جزء از حجم معرف سفره^۱ با ابعاد Δx ، Δy (افقی) و Δz (عمودی) در نظر گرفته و سپس معادلات پیوستگی^۲ را نوشته و با معادلات حرکت^۳ تلفیق می‌کنیم. از تلفیق معادلات فوق و با در نظر گرفتن اصل بقاء انرژی:

تغییرات ذخیره = خروجی - ورودی

^۱REV, Reprehensive Elementary Volume

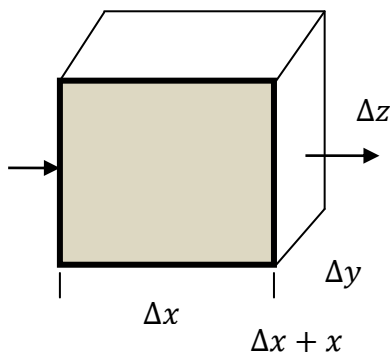
^۲Continuity Equation

^۳Momentum Equation

معادله اساسی جریان آب زیرزمینی بدست می آید. که در حالت پایدار و با در نظر گرفتن تغییرات ذخیره در زمان برابر صفر، به صورت زیر نوشته می شود.

(۲-۱)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$



h بار هیدرولیکی (L)

x, y, z جهات سه گانه (L)

T تانسور ضریب قابلیت انتقال سفره ($L^2 T^{-1}$)

شکل (۲-۱): یک المان فرضی

معادله فوق در یک محیط همگن، با در نظر گرفتن $T_x = T_y = T_z$ به صورت زیر در می آید:

(۳-۱)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

که در محیط دو بعدی بصورت زیر است:

(۴-۱)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

معادله دیفرانسیل جزئی فوق که از نوع بیضوی و معروف به معادله لاپلاس^۱ است، معادله اساسی جریان در آب‌های زیرزمینی در یک سفره همگن، یکنواخت و در شرایط پایدار را تشکیل می‌دهد. بدیهی است برای اینکه بتوان معادله فوق را حل کرد، بایستی شرایط روی مرزهای سیستم و نحوه اتصال آن به سفره مشخص باشد.

برای حل معادله لاپلاس می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. روش‌های تحلیلی به دلیل محدودیت، با اینکه می‌توانند دقیق‌تر از روش‌های عددی باشد، عملاً در سطح وسیع مدل-سازی سفره کاربرد ندارد بنابراین با استفاده از روش‌های عددی می‌توان معادله مذکور را حل کرد [۳۵]. در بخش مدل‌های آب زیرزمینی در رابطه با روش‌های عددی به صورت مفصل‌تری بحث شده است.

۱-۴-۳- معادله پواسون در آب‌های زیرزمینی

معمولاً معادلات پایه در طبیعت آبخوان‌ها، کمتر به صورت معادله لاپلاس شکل می‌گیرد زیرا رد و بدل جریان آب در یک سیستم آب زیرزمینی به طور معمول انجام می‌گیرد. می‌دانیم که در اکثر مواقع مقادیر تغذیه (ناشی از بارندگی، نفوذ سیلاب‌ها، آب برگشتی و...) و تخلیه (توسط چاه و زهکشی...) وجود دارد. لذا معادله آب‌های زیرزمینی در حالت پایدار و با در نظر گرفتن مقادیر تغذیه و تخلیه به صورت زیر در می‌آید:

(۵-۱)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \pm \frac{R_{(x,y)}}{T}$$

که در این معادله R مقدار تغذیه و یا تخلیه (با بعد LT^{-1}) می‌باشد.

^۱Laplace Equation

روش حل معادله پواسون همانند روش حل معادله لاپلاس می‌باشد فقط با این تفاوت که در اینجا مقادیر تخلیه و تغذیه نیز لحاظ می‌شوند. معادله پواسون در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی برای حالت پایدار به عنوان معادله اصلی می‌باشد. به طور مثال حالتی که می‌توان آن را پایدار دانست، مسئله نشت^۱ از سد خاکی است. در غیر اینصورت در طبیعت آبخوان‌ها اکثراً حالت ناپایدار بوجود می‌آید. مگر اینکه زمان بررسی طولانی در نظر گرفته شود که تغییرات مقدار پتانسیل سطح آب سفره نسبت به زمان برابر با صفر باشد [۴].

۱-۴-۴- معادله آب‌های زیرزمینی در حالت ناپایدار^۲

معادله اصلی جریان آب زیرزمینی در حالت ناپایدار به صورت زیر می‌باشد:

(۱-۶)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \pm \frac{R}{T}$$

که در آن S ضریب ذخیره (بدون بعد) و t زمان (t) می‌باشد.

معادله مذکور که جزء معادلات دیفرانسیل (سه‌موی^۳) است از طریق یکی از روش‌های عددی حل می‌گردد.

۱-۵- مقدمه‌ای بر مدل‌های جریان آب زیرزمینی

یک مدل آب زیرزمینی فرم ساده شده‌ای از یک سیستم آب زیرزمینی است که همبستگی

بین کنش^۴ و واکنش^۵ هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد [۴].

^۱Seepage

^۲Transient

^۳Parabolic

^۴Excitation

^۵Response

۱-۵-۱- مدل‌های فیزیکی^۱

منظور از مدل فیزیکی ساخت نمونه‌ای از طرح واقعی ولی با ابعاد کوچک‌تر است به طوری که رفتارهای هیدرولیکی-دینامیکی در نمونه کوچک شده منطبق بر نمونه واقعی باشد. مسلماً مدل‌های فیزیکی در مقایسه با مدل‌های ریاضی دارای مزیت‌های کمتری می‌باشند ولی از آنجا که رفتار هیدرولیکی در مدل به اصل شباهت بیشتر دارد و جریان‌های سه بعدی را می‌توان به راحتی مدل کرد، هنوز این مدل‌ها در علوم مهندسی کاربرد وسیعی دارند. مدل‌های شفاف و مدل‌های ذخیره ماسه‌ای که اولین بار توسط فورچایمر^۲ و در سال ۱۸۹۷ ساخته شد، از جمله مدل‌های فیزیکی محسوب می‌شوند. در این مدل‌ها مشکل مقیاس وجود دارد [۱۲].

۱-۵-۲- مدل‌های آنالوگ^۳

در این مدل‌ها بر خلاف مدل‌های فیزیکی از موادی غیر از مواد آبخوان جهت شبیه‌سازی جریان استفاده می‌شود که این مواد رفتاری شبیه به مواد آبخوان دارند [۱۳].

۱-۵-۲-۱- مدل‌های الکتریکی^۴

آقای لوتین^۵ نشان داده است که چگونه جریان الکتریسیته و جریان آب در یک محیط متخلخل از یک روند تبعیت می‌کنند. دقت این مدل‌ها خوب و محدودیتشان رعایت مسئله

^۱Physical model

^۲Forchheimer

^۳Analog models

^۴Electrical models

^۵luthin

همگن^۱ و همسان^۲ بودن محیط مورد مطالعه می‌باشد. مزیت این مدل‌ها این است که می‌توان مسائلی با ابعاد بزرگ را نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار داد [۴۸].

۱-۵-۲-۲- مدل هله - شاو^۳

جریان ورقه‌ای آب به سمت یک زهکش را می‌توان به وسیله مدل هله - شاو بررسی کرد. مارینو^۴ (۱۹۶۷) رشد و کاهش آب زیرزمینی را با استفاده از این مدل شبیه‌سازی کرد. کاربرد این مدل نیز در سیستم‌های همگن و همسان است. زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش زیاد و به علت گرانی، کاربرد آن محدود است [۵۰].

۱-۵-۲-۳- مدل جعبه شنی^۵

از این مدل می‌توان برای یافتن رفتار آب در مواقعی که آب به سمت یک چاه در حرکت می‌باشد، استفاده نمود. این مدل انعطاف‌پذیری زیادی ندارد و در آن محدودیت‌هایی نیز از قبیل اندازه به چشم می‌خورد [۵۰].

۱-۵-۳- مدل‌های ریاضی^۶

در دهه‌های اخیر با پیشرفت کامپیوتر، مدل‌های ریاضی زیادی به وجود آمده است که امروزه کاربرد وسیعی در مطالعه و شناخت آب‌های زیرزمینی داشته‌اند. مدل‌های ریاضی با راه حل

^۱Homogenous

^۲Isotrop

^۳Hele-shaw

^۴Marino

^۵Sand box

^۶Mathematical Models