





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده علوم زمین

گروه آب‌شناسی و زمین‌شناسی زیست محیطی

بررسی تأثیر توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب بر فرونشست زمین در

سطح شهر مشهد

دانشجو:

زهرا تندیسه

استاد راهنما:

دکتر ناصر حافظی مقدس

دکتر غلامحسین کرمی

استاد مشاور:

دکتر هادی جعفری عظیم آبادی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ماه ۱۳۹۲

الهی!

زندگانی همبایا تو،

شادی همبایافت تو.

و جان آنست که درو شناخت تو!

الهی!

موجود نفس های جوانمردانی

حاضر دل های ذاکرانی،

از نزدیک نشانت می دهند و برتر از آنی

و از دورت می پندارند و نزدیک تر از جانی، ندانم که در جانی یا خود جانی

جان را زندگی میباید.

تو آنی!

تقدیم به یگانه عالم امکان، از سلاله پاکان، کاملترین انسان، حجت ابن الحسن العسکری (عج)

کفتم صفا! مگر که جانان منی!

اکنون که همی نکه کنم جان منی!

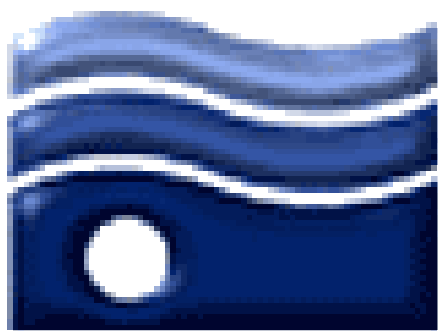
## شکر و قدردانی

با تقدیر و درود فراوان خدمت‌پدر و مادر بسیار عزیز، دلسوز و خداکلام که پیوسته جرعه نوش جام تعلیم و تربیت، فضیلت و انسانیت آنها بوده ام و همواره چراغ وجودشان روشنگر راه من در سختی‌ها و مشکلات بوده است.

از استاد گرامی و ارجمندم جناب آقای دکتر حافظی مقدس که با سه صدر و رهنمودهای ارزنده‌شان در تمام مراحل پیمان نامه همراه اینجانب بودند و همچنین از استاد گران قدر جناب آقای دکتر کریمی که قبول زحمت فرمودند و با ارائه راهنمایی‌های بسیار ارزشمند سبب غنای این پژوهش گردیدند کمال شکر و قدردانی را دارم. از جناب آقای دکتر حفی که مشاوره این پروژه را بر عهده داشتند سپاسگزارم. از اساتید محترم گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود، که افتخار شاگردی ایشان را داشته‌ام و نیز عزیزانی که توفیق حضور در محضرشان میسر شد، قدردانی می‌نمایم و از خداوند مهربان برایشان توفیقات روز افزون خواستارم. همچنین از کارشناسان محترم گروه زمین‌شناسی، آقایان مهندس میرباقری، مهندس خانعلی زاده، خانم مهندس فارسی و سعیدی به خاطر زحماتشان سپاسگزارم.

انجام این پیمان نامه با حمایت اطلاعاتی و مالی سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی امکان‌پذیر گردید لذا از ریاست محترم این سازمان، مدیریت محترم دفتر مطالعات پایه منابع آب و دبیر کمیته تحقیقات کاربردی، مسئولین طرح و کلیه کارشناسان این سازمان و زیرمجموعه آن نهایت سپاس را دارم. با ائتمان بیکران از مساعدت‌های بی‌شائبه‌ی جناب آقای زعفرانی ریاست محترم روابط عمومی سازمان آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، از دیگر دست‌اندرکاران این سازمان قدردانی می‌نمایم. از آقایان مهندس بهزادی فر، مهندس سعیدی، مهندس مدنی، مهندس حسینی، مهندس فدایی، شمس زاده، مهندس زارع صفت و خانم مهندس غلامی، میرفخاری، حیران، مهندس اخلاقی و دکتر قزوی کمال شکر را می‌نمایم و برای یکایک این عزیزان آرزوی سعادت و سربلندی دارم.

و با شکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مراد به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند.



وزارت نیرو

شرکت مدیریت منابع آب ایران

این پایان نامه با حمایت اطلاعاتی و پشتیبانی مالی شرکت

آب منطقه امی خراسان رضوی اجرا شده است.

## تعهد نامه

اینجانب زهرا تندیسه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین شناسی زیست محیطی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تأثیر توسعه شبکه جمع آوری فاضلاب بر فرورانش زمین در سطح شهر مشهد تحت راهنمایی دکتر ناصر حافظی مقدس متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## چکیده

شهر مشهد با وسعت بیش از ۲۰۰ کیلومتر مربع در مرکز حوضه آبریز کشف‌رود و در دشت مشهد قرار گرفته است. با توجه به محدود بودن منابع آب و همچنین به برداشت بی‌رویه از آبخوان، ارتفاع سطح آب زیرزمینی در این دشت به طور مداوم در حال کاهش است به صورتی که میانگین افت سالیانه در این دشت ۱/۰۳ متر می‌باشد. هدف اساسی از انجام این تحقیق، مدل‌سازی ریاضی آبخوان شهر مشهد به منظور پیش‌بینی رفتار آبخوان برای شرایط مختلف از جمله تأثیر جمع‌آوری فاضلاب بر فرونشست زمین می‌باشد. برای دستیابی به این هدف از نرم‌افزار GMS در قالب کد کامپیوتری MODFLOW استفاده شده است. پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز از قبیل داده‌های پمپاژ، لاگ‌های حفاری مربوط به چاه‌ها، داده‌های سطح آب و داده‌های ژئوفیزیکی، مدل مفهومی آبخوان آبرفتی شهر مشهد ساخته شد. مدل تهیه شده آبخوان با استفاده از داده‌های ۱۷ حلقه چاه مشاهده‌ای طی شرایط پایدار (مهر ۱۳۸۷) و در شرایط ناپایدار (آبان ۱۳۸۷ تا مهر ۱۳۸۸) واسنجی گردید. پارامترهای K و S از مهمترین پارامترهایی هستند که در این مراحل بهینه‌سازی می‌شوند. بر اساس نتایج حاصله مقادیر متوسط هدایت هیدرولیکی از ۱ تا ۱۶ متر بر روز و متوسط آبدهی ویژه از ۰/۰۰۰۰۱ تا ۰/۲۵ متغیر است. تحلیل حساسیت مدل طراحی شده نسبت به تغییر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله بیانگر این است که بیشترین حساسیت مدل مربوط به مقادیر پارامتر هدایت هیدرولیکی می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده در مرحله صحت‌سنجی (آبان ۱۳۸۸ تا مهر ۱۳۸۹) درستی مدل ساخته شده مورد تأیید قرار گرفت. در نهایت از مدل صحت‌سنجی شده جهت پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان برای سناریوی توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب و تأثیر آن بر سطح آب زیرزمینی استفاده شده و نتایج حاصله مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج حاصل از اجرای مدل تهیه شده نشان می‌دهد که با تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب و کاهش تغذیه آب زیرزمینی توسط فاضلاب، در پایان اجرای طرح سطح آب زیرزمینی با متوسط افت ۱۶ متر مواجه می‌شود. با توجه به بافت خاک شهر مشهد و ضخامت آبخوان آبرفتی در این شهر میزان فرونشست منطقه بر پایه روابط زمین‌شناسی مهندسی قابل محاسبه است. میزان فرونشست در حالت فوق بحرانی از حداقل ۵۰ سانتی‌متر تا حداکثر ۲۵۰ سانتی‌متر در سطح شهر مشهد متغیر است. این پروژه توانایی و وسعت دید ما را برای برنامه‌ریزی استخراج از منابع آب زیرزمینی و مدیریت استانداردهای ساخت و ساز افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: شبکه جمع‌آوری فاضلاب، مدل‌سازی آبخوان، GMS، فرونشست

## فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان

### فصل اول: کلیات

- ۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق ..... ۱
- ۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه ..... ۳
- ۳-۱- شرایط اقلیمی منطقه ..... ۴
- ۴-۱- جمعیت منطقه و پیش‌بینی آینده ..... ۶
- ۵-۱- میزان نیاز آبی منطقه ..... ۷

### فصل دوم: زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

- ۱-۲- زمین‌شناسی منطقه ..... ۱۰
- ۲-۲- ریخت‌شناسی منطقه ..... ۱۲
- ۳-۲- زمین‌شناسی ساختمانی ..... ۱۴
- ۴-۲- چینه‌شناسی ..... ۱۶
- ۵-۲- بافت خاک شهر مشهد ..... ۲۱
- ۶-۲- هیدروژئولوژی منطقه ..... ۲۵
- ۷-۲- هیدروژئولوژی منطقه ..... ۲۸
- ۱-۷-۲- بررسی وضعیت کمی سیستم آب زیرزمینی ..... ۳۲
- ۱-۱-۷-۲- نقشه تراز سطح آب زیرزمینی ..... ۳۲
- ۲-۱-۷-۲- هیدروگراف واحد دشت مشهد ..... ۳۳
- ۳-۱-۷-۲- نقشه افت سطح آب زیرزمینی ..... ۳۵
- ۴-۱-۷-۲- نقشه هم عمق سطح آب زیرزمینی ..... ۳۶
- ۲-۷-۲- بررسی وضعیت کیفی سیستم آب زیرزمینی ..... ۳۷



- ۳۸..... ۱-۲-۷-۲ - هدایت الکتریکی (EC) .....
- ۴۰..... ۲-۲-۷-۲ - تغییرات کلر .....
- ۴۱..... ۳-۲-۷-۲ - تیپ محدوده مطالعاتی .....
- ۴۳..... ۴-۲-۷-۲ - ارزیابی آب برای مصارف مختلف در دشت مشهد .....

### فصل سوم: معرفی پدیده فرونشست

- ۴۴..... ۱-۳-۱ - مقدمه .....
- ۴۵..... ۲-۳-۲ - مروری بر مطالعات بررسی فرونشست‌ها .....
- ۴۵..... ۱-۲-۳-۱ - مطالعات جهانی .....
- ۵۱..... ۲-۲-۳-۲ - مطالعات در ایران .....
- ۵۴..... ۳-۲-۳-۳ - مطالعات در مشهد .....
- ۵۶..... ۳-۳-۲-۳ - ارزیابی فرونشست زمین بر اساس مدل‌سازی .....
- ۵۶..... ۱-۳-۳-۱ - مروری بر مطالعات مدل‌سازی آبخوان‌ها در جهان .....
- ۵۹..... ۲-۳-۳-۲ - مروری بر مطالعات مدل‌سازی آبخوان‌ها در ایران .....
- ۶۲..... ۳-۳-۳-۳ - مطالعات مدل‌سازی انجام شده در دشت مشهد .....
- ۶۴..... ۴-۳-۴-۲ - تعریف و مراحل مدل‌سازی .....
- ۶۶..... ۱-۴-۳-۱ - تعیین هدف .....
- ۶۶..... ۲-۴-۳-۲ - طراحی مدل مفهومی .....
- ۶۶..... ۳-۴-۳-۳ - انتخاب کد .....
- ۶۶..... ۴-۴-۳-۴ - طراحی مدل .....
- ۶۷..... ۵-۴-۳-۵ - واسنجی مدل .....
- ۶۷..... ۶-۴-۳-۶ - آنالیز حساسیت .....

۶۷.....	۷-۴-۳- صحت سنجی
۶۷.....	۸-۴-۳- پیش‌بینی
۶۷.....	۹-۴-۳- بازرسی مجدد
۶۸.....	۵-۳- شرایط مرزی
۶۹.....	۶-۳- مقدار اولیه بار هیدرولیکی
۶۹.....	۷-۳- گسسته‌سازی مکانی
۷۰.....	۸-۳- گسسته سازی زمانی
۷۰.....	۹-۳- معرفی نرم افزار GIS و مدول‌های آن
۷۳ .....	۱-۹-۳- TIN Module
۷۳.....	۲-۹-۳- Solid Module
۷۴.....	۳-۹-۳- Borehole Module
۷۴.....	۴-۹-۳- 2D Mesh Module
۷۵.....	۵-۹-۳- 2D Grid Module
۷۵.....	۶-۹-۳- 2D Scatter Point Module
۷۶.....	۷-۹-۳- 3D Scatter Point Module
۷۶.....	۸-۹-۳- 3D Mesh Module
۷۶.....	۹-۹-۳- 3D Grid Module
۷۷.....	۱۰-۹-۳- Map Module
۷۷.....	۱۱-۹-۳- GIS Module
۷۷.....	۱۲-۹-۳- مزایای GIS

#### فصل چهارم: طراحی و اجرای مدل

۷۹.....	۱-۴- مقدمه
۷۹.....	۲-۴- تهیه مدل مفهومی

- ۳-۴- شرایط اولیه ..... ۸۰
- ۴-۴- تبیین شرایط مرزی مدل ..... ۸۲
- ۵-۴- انتخاب معادله جریان و کد کامپیوتری مناسب ..... ۸۴
- ۶-۴- طراحی و تهیه مدل مفهومی ..... ۸۵
- ۱-۶-۴- لایه اطلاعاتی آبخوان ..... ۸۵
- ۲-۶-۴- لایه اطلاعاتی پیزومتر ..... ۸۵
- ۳-۶-۴- لایه اطلاعاتی چاه بهره‌برداری ..... ۸۷
- ۴-۶-۴- لایه اطلاعاتی تغذیه ..... ۸۹
- ۵-۶-۴- لایه اطلاعاتی تبخیر ..... ۹۰
- ۶-۶-۴- لایه اطلاعاتی رودخانه ..... ۹۱
- ۷-۶-۴- مشخص نمودن مرزها و خصوصیات هیدروژئولوژیکی آنها ..... ۹۱
- ۸-۶-۴- پارامترهای هیدرولیکی آبخوان ..... ۹۴
- ۷-۴- طراحی و اجرای مدل ..... ۹۵
- ۱-۷-۴- تهیه شبکه مدل و گسسته‌سازی مکانی ..... ۹۵
- ۲-۷-۴- تبدیل مدل مفهومی به مدل عددی ..... ۹۶
- ۸-۴- واسنجی مدل کمی ..... ۹۶
- ۱-۸-۴- واسنجی مدل در حالت پایدار ..... ۹۷
- ۲-۸-۴- گسسته‌سازی زمانی برای حالت ناپایدار ..... ۹۹
- ۳-۸-۴- واسنجی در حالت ناپایدار ..... ۱۰۰
- ۹-۴- تحلیل حساسیت مدل ..... ۱۰۲
- ۱۰-۴- صحت سنجی مدل ..... ۱۰۳
- ۱۱-۴- محاسبه بیلان آب زیرزمینی آبخوان شهر مشهد ..... ۱۰۴
- ۱۲-۴- پیش‌بینی مدل ..... ۱۰۵

### فصل پنجم: ارزیابی نشست زمین در محدوده شهر مشهد

- ۱-۵- مقدمه ..... ۱۱۲
- ۲-۵- مکانیزم فرونشست ..... ۱۱۲
- ۳-۵- ارزیابی فرونشست زمین در سطح شهر مشهد ..... ۱۱۵

### فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۱-۶- مقدمه ..... ۱۲۴
- ۲-۶- نتیجه‌گیری ..... ۱۲۵
- ۳-۶- پیشنهادها ..... ۱۲۷

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- موقعیت شهر مشهد در حوضه آبریز کشف رود و دشت مشهد (علیزاده ۱۳۸۳)..... ۳
- شکل ۱-۲- ژئومورفولوژی دشت مشهد (Global Mapper12) ..... ۱۱
- شکل ۲-۲- نقشه پهنه بندی شهر مشهد از نظر محیط رسوبی (حافظی مقدس ۱۳۸۶)..... ۱۲
- شکل ۲-۳- نقشه زمین شناسی شهر مشهد بر اساس داده‌های آب منطقه‌ای ..... ۲۱
- شکل ۲-۴- نقشه بافت خاک سطحی مشهد (حافظی مقدس ۱۳۸۶)..... ۲۵
- شکل ۲-۵- هیدروگراف متوسط ماهانه ایستگاه انگ اسدی ..... ۲۷
- شکل ۲-۶- موقعیت منابع آبی در آبخوان آبرفتی شهر مشهد و حومه ..... ۳۰
- شکل ۲-۷- لاگ برخی از چاه‌ها و پی‌زومترهای آبخوان شهر مشهد (حافظی مقدس ۱۳۸۶)..... ۳۱
- شکل ۲-۸- نقشه هم پتانسیل منطقه براساس داده‌های شهر یور ۸۷ ..... ۳۳
- شکل ۲-۹- هیدروگراف واحد دشت مشهد ..... ۳۵
- شکل ۲-۱۰- نقشه هم افت منطقه طی دوره اسفند ۷۳ و اسفند ۸۸ ..... ۳۶
- شکل ۲-۱۱- نقشه هم عمق منطقه بر اساس داده های مهر ۸۸ ..... ۳۷
- شکل ۲-۱۲- نقشه هم مقدار هدایت الکتریکی بر اساس آنالیزهای ۱۳۸۵ ..... ۳۹
- شکل ۲-۱۳- کموگراف معرف کیفی آبخوان دشت مشهد ..... ۴۰
- شکل ۲-۱۴- نقشه هم مقدار کلر بر اساس آنالیزهای ۱۳۸۵ ..... ۴۱
- شکل ۲-۱۵- تیپ آب زیرزمینی بر اساس آنالیزهای ۱۳۸۵ ..... ۴۲
- شکل ۱-۳- مراحل مدل سازی بر گرفته از (Anderson & Woessner, 1992) ..... ۶۵
- شکل ۲-۳- نمایش سطح مدل شده در مدول TIN ..... ۷۳
- شکل ۳-۳- نمایش چینه بندی خاک در مدول گمانه ..... ۷۴
- شکل ۳-۴- نمایش شبکه با عناصر محدود دو بعدی ..... ۷۵
- شکل ۳-۵- درون یابی داده های غلظت آلاینده در شبکه تفاضل محدود دوبعدی ..... ۷۵
- شکل ۳-۶- شبکه سه بعدی عناصر محدود ..... ۷۶

- شکل ۳-۷- شبکه سه بعدی تفاضل محدود ..... ۷۷
- شکل ۴-۱- محدوده مطالعاتی آبخوان شهر مشهد ..... ۸۳
- شکل ۴-۲- لایه اطلاعاتی پیژومتر در حالت پایدار ..... ۸۶
- شکل ۴-۳- لایه اطلاعاتی پیژومتر در حالت ناپایدار ..... ۸۶
- شکل ۴-۴- لایه اطلاعاتی چاه‌های بهره‌برداری در حالت پایدار ..... ۸۸
- شکل ۴-۵- لایه اطلاعاتی چاه‌های بهره‌برداری در حالت ناپایدار ..... ۸۸
- شکل ۴-۶- زون بندی تغذیه ورودی به مدل ..... ۸۹
- شکل ۴-۷- لایه اطلاعاتی رودخانه ..... ۹۱
- شکل ۴-۸- لایه اطلاعاتی مرز با بار عمومی ..... ۹۲
- شکل ۴-۹- تراز لایه فوقانی محدوده مورد مطالعه ..... ۹۳
- شکل ۴-۱۰- تراز سنگ بستر محدوده مورد مطالعه ..... ۹۴
- شکل ۴-۱۱- منطقه بندی اولیه هدایت هیدرولیکی ..... ۹۵
- شکل ۴-۱۲- منطقه بندی اولیه آبدهی ویژه ..... ۹۵
- شکل ۴-۱۳- سلول‌های فعال و غیر فعال در محدوده مطالعاتی ..... ۹۶
- شکل ۴-۱۴- میانگین خطای آخرین اجرای مدل در حالت پایدار ..... ۹۸
- شکل ۴-۱۵- وضعیت تراز سطح آب زیرزمینی (بر حسب متر) بعد از مرحله واسنجی در شرایط پایدار ..... ۹۸
- شکل ۴-۱۶- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای آخرین اجرای مدل در حالت پایدار ..... ۹۸
- شکل ۴-۱۷- دوره‌های تنش و گام‌های زمانی در حالت ناپایدار ..... ۹۹
- شکل ۴-۱۸- تراز سطح آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی بعد از مرحله واسنجی شرایط ناپایدار دوره اول ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۹- میانگین خطای آخرین اجرای مدل در حالت ناپایدار ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۰- برازش مقادیر بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی دوره اول ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۱- برازش مقادیر بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی دوره دوم ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۲- برازش مقادیر بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی دوره سوم ..... ۱۰۱

- شکل ۴-۲۳- برآزش مقادیر بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی دوره چهارم ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۴- زون بندی نهایی محدوده مطالعاتی بعد از مرحله واسنجی ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۲۵- انواع میانگین خطاها در دوره‌های زمانی ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۶- بیلان آبی مدل آبخوان شهر مشهد در استرس پی‌یود هشتم ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۲۷- زمان بندی مدل سازی دوره پیش بینی ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۲۸- تغییرات سطح آب پی‌یومترهای محدوده مطالعاتی در طی مدل سازی (سالهای آبی ۱۳۹۵-۱۳۸۷) ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۲۹- تغییرات افت سطح ایستابی پس از اجرای مدل ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱- تغییرات سطح آب زیرزمینی در پروفیل خاک ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۲- (الف): منطقه بندی عمق سطح ایستابی آبخوان مشهد قبل (سال آبی ۸۹) و (ب): بعد از اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب (سال آبی ۹۵) ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۳- نقشه هم‌ضخامت آبرفت محدوده مطالعاتی ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۴- نقشه بافت خاک شهر مشهد (حافظی مقدس ۱۳۸۶) ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۵- (الف): رده بندی حداکثر میزان فرونشست و (ب): حداقل میزان آن بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب در سطح شهر مشهد ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۶- بررسی میزان فرونشست با گذشت زمان در گروه یک ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۷- بررسی میزان فرونشست با گذشت زمان در گروه دو ..... ۱۲۳

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده مشهد (بر اساس داده‌های آب منطقه‌ای خراسان رضوی) ۴...
- جدول ۱-۲- جمعیت پیش بینی شده شهر مشهد تا سال ۱۴۱۰ (برنامه جامع تأمین آب سال ۱۳۸۶) ۶.....
- جدول ۱-۳- مقایسه مصرف جمعیت ساکن و جمعیت متغیر (آب منطقه‌ای خراسان رضوی ۱۳۸۶) ۷.....
- جدول ۱-۴- متوسط نیاز آبی شهر مشهد بر حسب میلیون متر مکعب در سال (آب منطقه‌ای خراسان رضوی ۱۳۸۶) ۸....
- جدول ۱-۲- مشخصات ایستگاه هیدرومتری النگ اسدی (آب منطقه‌ای خراسان رضوی ۱۳۹۰) ۲۶.....
- جدول ۲-۲- آمار آبدهی متوسط ماهانه و دبی پایه رودخانه کشف رود در ایستگاه النگ اسدی ۲۷.....
- جدول ۲-۳- منابع آبی دشت مشهد (آب منطقه‌ای خراسان رضوی ۱۳۹۰) ۳۱.....
- جدول ۱-۴- مختصات جغرافیایی چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان شهر مشهد ۸۱.....
- جدول ۲-۴- درصد ضرایب ماهانه تخلیه هر چاه (آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی) ۸۷.....
- جدول ۳-۴- تغذیه ورودی به مدل (آب منطقه‌ای خراسان رضوی ۱۳۹۰) ۱۰۶.....
- جدول ۱-۵- رده بندی عمق سطح آب زیرزمینی در محدوده شهر مشهد ۱۱۵.....
- جدول ۲-۵- رده بندی ضخامت آبرفت در محدوده مورد مطالعه ۱۱۶.....
- جدول ۳-۵- رده بندی آبخوان آبرفتی شهر مشهد بر حسب بافت خاک غالب ۱۱۷.....
- جدول ۴-۵- محاسبه حداکثر و حداقل میزان فرونشست بر حسب شاخص فشردگی و ضریب تحکیم ۱۱۸.....
- جدول ۵-۵- منطقه بندی محدوده شهر مشهد بر حسب میزان فرونشست و پتانسیل خطر ۱۲۰.....



## فصل اول: کلیات

### ۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

به علت شرایط اقلیمی و جغرافیایی خاص، کشور ما منطقه‌ای کم باران است. مقایسه بین تراز نامه آب ایران و قاره‌های مختلف نشان می‌دهد که اختلاف قابل توجهی بین مقدار آب در کشور ما و بسیاری از مناطق جهان وجود دارد. به عنوان مثال مقدار بارندگی سالانه در ایران برابر با ۲۵۰ میلی‌متر است که این مقدار کمتر از یک سوّم بارندگی در سطح خشکی‌های زمین (۸۳۰ میلی‌متر) و حدود یک سوم متوسط بارندگی در سطح قاره آسیاست. بر عکس بارندگی، متوسط تبخیر واقعی در کشور بیش از ۷۰ درصد بارش سالانه است که جز آفریقا و استرالیا از قاره‌های دیگر بیشتر است (ناسوتی، ۱۳۷۳). بنابراین بزرگترین منبع تأمین آب در کشور را، ذخایر آب زیرزمینی تشکیل می‌دهد. محدودیت منابع آبهای سطحی و برداشت بی‌رویه و بیش از حد مجاز از آب زیرزمینی باعث وارد آمدن خسارات جبران ناپذیری به منابع آب کشور در سال‌های گذشته شده است. افت شدید سطح آب در آبخوان‌ها، علاوه بر افزایش هزینه استخراج آب، نفوذ آبهای شور باعث ترک خوردن خاک و نشست سطح زمین می‌گردد که در برابر عمده خطرات زیست‌محیطی، نشست زمین نسبت به زمین لغزش، زلزله، آتشفشان و سیل، اغلب به عنوان خطر فرعی در نظر گرفته می‌شود اما نشست زمین به یک کمر بند باریک زلزله یا یک محدوده با شیب تند و دارای استعداد لغزش محدود نمی‌شود و در مناطق وسیعی قابل وقوع است، به ویژه مناطقی که پتانسیل گسیختگی در زیر زمین نهفته است (Waltham, 1989). متأسفانه این خطر در مناطق شهری به علت رشد روز افزون جمعیت و توسعه تأسیسات گوناگون (مسکونی، تجاری و ...) از لحاظ اقتصادی تهدیدی جدی به شمار می‌رود. بنابراین برای جلوگیری از افت کمی و کیفی آبخوان‌ها و پیشگیری از نشست زمین در مناطق مستعد، حفاظت از آب زیرزمینی و مدیریت بهره‌برداری باید در اولویت برنامه‌ریزی‌های کشور قرار گیرد. در این رابطه، مدل ریاضی در صورت

شناخت درست و به شرط آماده بودن زمینه، می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد در اختیار مدیران قرار گیرد. مدل ریاضی آب زیرزمینی، شبیه سازی یک سامانه هیدروژئولوژیکی است که از قوانین فیزیک و ریاضی کمک می‌گیرد. مدل آب زیر زمینی ابزاری در اختیار قرار می‌دهد تا بتوان داده‌های موجود را تبدیل به ویژگی‌های عددی برای سامانه آب زیرزمینی نمود (مؤسسه تحقیقات آب، ۱۳۸۲). عمدتاً با استفاده از اطلاعات و داده‌های در دسترس و مدل سازی ریاضی آنها، می‌توان مقدار فرونشست را برآورد و با پیش‌بینی میزان آن در آینده، تبعات سوء آن را متذکر شد و جهت کاهش و یا حذف نمودن آن راهکارهایی ارائه داد.

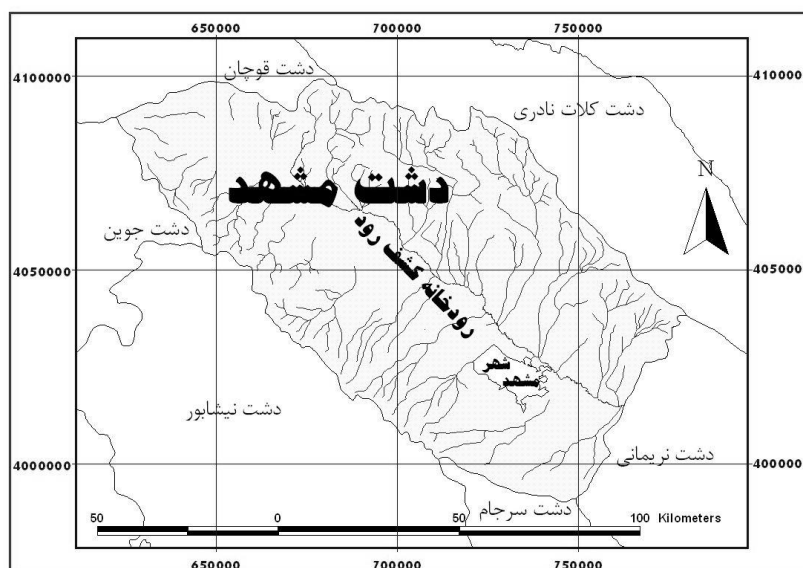
شهر مشهد با وسعتی حدود ۲۰۰ کیلومتر مربع در اقلیمی نیمه خشک واقع گردیده و از این رو از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی قابل ملاحظه‌ای که بتواند آینده‌ای پایدار برای این شهر فراهم آورد، برخوردار نیست. با توجه به افزایش جمعیت و روند رو به رشد مهاجرت به این شهر کمبود مداوم آب جهت تأمین نیازهای شرب و بهداشت شهر مشهد از مسائل مهم و مورد توجه کارشناسان است. در این شرایط بازچرخانی آب مصرفی در بخشهای صنعت و شهری امری اجتناب‌ناپذیر بوده بلکه الزامی می‌باشد. زیرا گرچه ایده استفاده از بازچرخانی آبهای مصرفی با اجتماعات انسانی فکر جدیدی نیست و از قرون و اعصار پیش مرسوم بوده است ولی در شرایط فعلی به‌ویژه در نقاطی که آب مصرفی شهری وابسته به سفره آب زیرزمینی است و تصفیه فاضلابهای شهری برای رعایت سلامت محیط زیست در دست اجراست، بازچرخانی پساب حاصل از تصفیه فاضلابهای شهری راهکار مناسبی برای جلوگیری از افت مضاعف سفره آب زیرزمینی خواهد شد.

به‌طورکلی سالانه حدود ۱۶۰ میلیون متر مکعب آب به صورت فاضلاب آبخوان شهر مشهد را تغذیه می‌کند (سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۰). از آنجا که طرح جمع‌آوری فاضلاب در سطح شهر مشهد در حال اجراء است با گذشت زمان، یکی از منابع عمده تغذیه آبخوان مشهد با کاهش مواجه می‌شود که تأثیر قابل توجهی بر سطح آب زیرزمینی دشت خواهد گذاشت. در این تحقیق سعی می‌گردد آبخوان شهر مشهد شبیه‌سازی شده و مدل ریاضی بدست آمده جهت پیش‌بینی تغییرات

سطح آب زیرزمینی و تأثیر آن بر فرونشست زمین در سطح شهر مشهد، بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب به کار گرفته شود. برای مدل‌سازی یک آبخوان در ابتدا لازم است منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته و اطلاعات کاملی از موقعیت جغرافیایی، خصوصیات اقلیمی، وضعیت عمومی منطقه تهیه شود. در این فصل، منطقه مورد مطالعه از لحاظ این ابعاد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین قابل ذکر است که اطلاعات موجود در این فصل بر اساس گزارش‌ها و داده‌های موجود در سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی تنظیم و تدوین شده است.

## ۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد به عنوان مرکز استان خراسان رضوی ما بین رشته کوه هزار مسجد و بینالود در منتهی الیه دشت مشهد در ارتفاع حدود ۹۶۰-۱۱۱۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است. وسعت این شهر ۲۸۰ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۹۸۰ متر است. همچنین شهر مشهد از نظر هیدرولوژیکی جزء دشت مشهد و حوضه آبریز رودخانه کشف رود می‌باشد (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱- موقعیت شهر مشهد در حوضه آبریز کشف رود و دشت مشهد (علیزاده، ۱۳۸۳)

این حوضه در شمال استان خراسان در طول جغرافیایی  $20^{\circ} - 59^{\circ}$  تا  $8' - 60^{\circ}$  و عرض  $35^{\circ} - 40'$  تا  $3' - 36^{\circ}$  واقع است و از شمال به خط الراس ارتفاعات هزار مسجد، از جنوب به حوضه آبریز جام رود و از غرب به حوضه آبریز رودخانه اترک محدود می‌شود.

### ۳-۱- شرایط اقلیمی منطقه

از تاثیرگذارترین پارامترهای هواشناسی که نقش بسزایی در بیلان منابع آب دارند، می‌توان به بارندگی، تبخیر و درجه حرارت اشاره کرد. به منظور بررسی آب و هوای منطقه از آمار ایستگاه سینوپتیک و باران سنجی مشهد استفاده شده است (جدول ۱-۱).

جدول ۱-۱ - مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده مشهد (بر اساس داده‌های آب منطقه‌ای خراسان رضوی)

ملاحظات	تاریخ تاسیس	مشخصات جغرافیایی			نام ایستگاه	حوضه آبریز	ردیف
		ارتفاع (متر)	عرض	طول			
سینوپتیک	۱۳۳۵	۹۹۹	۳۶_۱۶	۵۹_۳۸	مشهد	قره قوم	۱
باران سنجی - نیروی ثبات	۱۳۴۶	۹۷۰	۳۶_۱۸_۴۷	۵۹_۳۴_۲۵	اداره مشهد	کشف رود	۲

بررسی نقشه میانگین دراز مدت درجه حرارت سالانه (هم دما) دشت مشهد نشان می‌دهد که به دلیل وجود ارتفاعات در شمال و جنوب به طرف مرکز متوسط درجه حرارت سالانه افزایش می‌یابد و متوسط سالانه دمای روزانه در ارتفاعات  $10/1$  و در دشت  $12/9$  درجه سانتی‌گراد است. گرم‌ترین ماه سال تیر ماه با  $24/4$  درجه سانتی‌گراد و سردترین ماه آن نیز دی ماه با  $0/9$  درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با استفاده از متوسط بارندگی  $40$  ساله ایستگاه‌های موجود در سطح محدوده مشهد (نقشه هم‌باران) نتیجه می‌شود که به دلیل وجود ارتفاعات در شمال (هزار مسجد) و جنوب (بینالود) دشت، به طرف مرکز از میزان بارندگی کاسته می‌شود. همچنین با استفاده از این نقشه میزان متوسط بارندگی سالانه

در ارتفاعات و دشت محدوده مشهد به ترتیب  $308/4$  و  $237/3$  میلی‌متر برآورد گردیده است. پرباران‌ترین ماه سال، فروردین ماه  $47/1$  میلی‌متر می‌باشد و کم باران‌ترین آن در شهریور ماه با  $1/4$  میلی‌متر محاسبه شده است. بیشترین مقدار تبخیر از سطح آزاد آب نیز در ارتفاعات و دشت مشهد به ترتیب در مرداد ماه ( $171$  و  $177$  میلی‌متر) و دی ماه ( $22/8$  و  $25/7$  میلی‌متر) گزارش شده است (آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی، ۱۳۹۰).

### تعیین اقلیم منطقه

حالت متوسط کمیت‌های مشخص کننده وضع هوای یک منطقه بدون توجه به لحظه وقوع آنها اقلیم نامیده می‌شود. اقلیم نتیجه تأثیر توأم پدیده‌های هواشناسی است. آنچه در مطالعات هواشناسی و هیدرولوژی حائز اهمیت است قرار دادن حوضه مورد مطالعه در یکی از گروه‌های مناسب اقلیمی است تا از روی آن بتوان در تفسیر نتایج محاسبات هواشناسی و هیدرولوژی کمک گرفت. از میان روش‌های مختلف برای تعیین اقلیم منطقه روش دومارتن به دلیل سادگی و جامعیت، مقبولیت بیشتری یافته است (علیزاده، ۱۳۸۹). در مطالعه حاضر پس از محاسبه درجه حرارت متوسط و متوسط بارش سالانه، بر مبنای بررسی اطلاعات دراز مدت دشت مشهد ضریب خشکی دومارتن  $10/36$  محاسبه گردید که با توجه به روش دومارتن از لحاظ اقلیمی دشت مشهد در اقلیم نیمه خشک قرار دارد. از ویژگی‌های آن دارا بودن تابستانهای گرم و زمستانهای سرد و مرطوب است. منطقه مورد بحث، در معبر گذر هوای خزری بین رشته کوه‌های هزار مسجد در شمال و ارتفاعات بینالود در جنوب و جبهه‌های مدیترانه‌ای از سمت غرب قرار گرفته است. جبهه هوای سرد سیبریایی از سمت شمال، منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، برخورد این دو جبهه اغلب سبب ریزش نزولات جوئی می‌گردد و نیز جبهه‌های کویر مرکزی از سمت جنوب در اقلیم حوضه تأثیر دارد. جهت باد غالب به سمت جنوب و جنوب شرق است و سرعت آن از حداقل  $2/2$  متر بر ثانیه در آذرماه تا حداکثر  $4/4$  متر بر ثانیه در اسفند ماه متغیر است (علیزاده، ۱۳۸۳).

## ۴-۱- جمعیت منطقه و پیش‌بینی آینده

شهر مقدس مشهد با توجه به موقعیت زیارتی و سیاحتی منحصر به فرد، هر ساله پذیرای میلیون‌ها نفر مشتاقان زیارت حرم رضوی می‌باشد که از اقصی نقاط کشور و جهان جهت زیارت بارگاه ملکوتی ثامن الحجج (ع) به این شهر مشرف می‌گردند. حضور میلیونی زائرین اگرچه این شهر را از پشتوانه معنوی و اقتصادی قابل ملاحظه‌ای برخوردار نموده ولی به همراه خود مشکل تأمین نیازهای بالای این جمعیت متغیر را نیز فراهم آورده است. بدون شک تأمین آب این شهر ضروری‌ترین و شاید از مشکل‌ترین و پرهزینه‌ترین بخش‌های ارائه خدمات شهری است. به ویژه آن که اقلیم خشک منطقه دسترسی به منابع آب را در این بخش از کشور با محدودیت‌های فنی و اقتصادی فراوانی روبرو کرده است. از طرف دیگر رشد جمعیت شهری با نرخ فزاینده روز افزون تقاضای آب شهری است که حاصل آن تشدید نگرانی‌های مسئولین تأمین آب شرب این قطب گردشگری- زیارتی کشور است. بر اساس سرشماری جمعیت در سال ۱۳۷۵ و سالهای قبل از آن روند تحولات جمعیت کلان شهر مشهد برای سالهای آتی و با توجه به نرخ رشد معادل ۳/۲ درصد برآورد گردیده بود. جمعیت سرشماری شده در سال ۱۳۸۵ برای شهر مشهد معادل ۲,۴۵۰,۰۰۰ نفر گزارش گردیده است یعنی ضریب رشد جمعیت بیشتر از مقدار واقعی منظور شده است. بنابراین جدول (۱-۲) براساس آمار مأخوذه جدید تنظیم و ضریب رشد جمعیت برای سالهای آتی مطابق مقادیر یاد شده در جدول پیش‌بینی شده است.

جدول ۱-۲- جمعیت پیش‌بینی شده شهر مشهد تا سال ۱۴۱۰ (آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۸۶)

سالهای طرح						ضریب رشد متوسط سالیانه (درصد)	
۱۴۱۰	۱۴۰۵	۱۴۰۰	۱۳۹۵	۱۳۹۰	۱۳۸۵		
۴۱۵۰	۳۷۸۰	۳۴۲۰	۳۰۹۰	۲۷۶۰	۲۴۲۷		ساکن
۲۹۶۰۰	۲۷۷۰۰	۲۵۶۰۰	۲۳۵۰۰	۲۱۳۰۰	۱۹۲۰۰		زوار (۴روز اقامت در سال)
۴۴۴۶	۴۰۵۷	۳۶۷۶	۳۳۲۵	۲۹۷۳	۲۶۱۹	جمع	
۱/۸۵		۲	۲/۰۳	۲/۲۶	۲/۵۶		

تغییر در میزان جمعیت تأثیر به سزایی در میزان نیاز آبی شهر خواهد داشت که می‌باید با توجه به جمعیت جدید نسبت به برآورد نیاز آبی اقدام نمود.

طبق گزارش‌ها مشخص است که جمعیت متغیر شهر مشهد (جمعیت زوار) در طول سال متفاوت می‌باشد. به طوری که در ایام تابستان به دلیل افزایش سفرهای بین شهری، تعطیلی مدارس و ... شاهد حضور بیشترین تعداد زوار در شهر مشهد می‌باشیم. مدت زمان متوسط اقامت برای هر نفر زائر به طور متوسط ۴ روز برآورد شده است (سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۸۶).

### ۱-۵- میزان نیاز آبی منطقه

سرانه مصرف برای هر نفر مطابق آمار سال ۱۳۸۵ حدود ۲۲۰ لیتر در شبانه روز محاسبه گردیده است. در جهت واقعی‌تر شدن برآورد سرانه مصرف، میزان ۲۲۰ لیتر در شبانه روز به عنوان مبنای محاسبات سال ۱۳۸۵ در نظر گرفته شده است و با ضریب رشد بسیار کوچک در سال هدف (۱۴۱۰) به ۲۴۵ لیتر در شبانه روز افزایش داده شده است. براساس بررسی‌های انجام گرفته مصرف سرانه جمعیت متغیر (زوار) در مقایسه مصرف سرانه جمعیت ساکن حدود ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. در جدول (۱-۳) مصرف سرانه جمعیت ساکن و متغیر طی سالهای ۱۳۸۵ لغایت ۱۴۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱-۳- مقایسه مصرف جمعیت ساکن و جمعیت متغیر (آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۸۶)

سال	متوسط مصرف سرانه جمعیت ساکن (لیتر در شبانه روز)	متوسط مصرف سرانه جمعیت متغیر (زائر) (لیتر در شبانه روز)
۱۳۸۵	۲۲۰	۱۱۰
۱۳۹۰	۲۲۵	۱۱۲/۵
۱۳۹۵	۲۳۰	۱۱۵
۱۴۰۰	۲۳۵	۱۱۷/۵
۱۴۰۵	۲۴۰	۱۲۰
۱۴۱۰	۲۴۵	۱۲۲/۵

با توجه به جمعیت ساکن و جمعیت زوار و مصرف سرانه جمعیت ساکن و جمعیت زوار طی سالهای مذکور متوسط نیاز آب سالانه طبق جدول (۱-۴) برآورد می‌گردد. در این جدول نیاز سرانه شرب شهر مشهد به انضمام آمار جمعیت ساکن و جمعیت متغیر به تصویر کشیده می‌شود.

جدول ۱-۴- برآورد متوسط نیاز آبی شهر مشهد (آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۰)

سال	ساکن			زوار		متوسط نیاز آبی (میلیون متر مکعب در سال)
	جمعیت ساکن (هزار نفر)	متوسط کل مصرف سرانه (لیتر در شبانه روز)	متوسط نیاز آبی (میلیون متر مکعب در سال)	جمعیت متغیر (هزار نفر)	متوسط کل مصرف (میلیون متر مکعب در سال)	
۱۳۷۵	۲۴۵۰	۲۲۰	۱۹۶	۱۷۵۲۳	۷/۷۱	۲۰۴
۱۳۹۰	۲۷۶۰	۲۲۵	۲۲۷	۱۹۴۷۰	۸/۷۶	۲۳۶
۱۳۹۵	۳۰۹۰	۲۳۰	۲۵۰	۲۱۴۲۷	۹/۸۵	۲۶۰
۱۴۰۰	۳۴۲۰	۲۳۵	۲۹۳	۲۳۳۶۴	۱۱/۰۰	۳۰۴
۱۴۰۵	۳۷۸۰	۲۴۰	۳۳۱	۲۵۲۴۴	۱۲/۱۷	۳۴۳
۱۴۱۰	۴۱۵۰	۲۴۵	۳۷۱	۲۷۰۰۸	۱۳/۳۵	۳۸۵



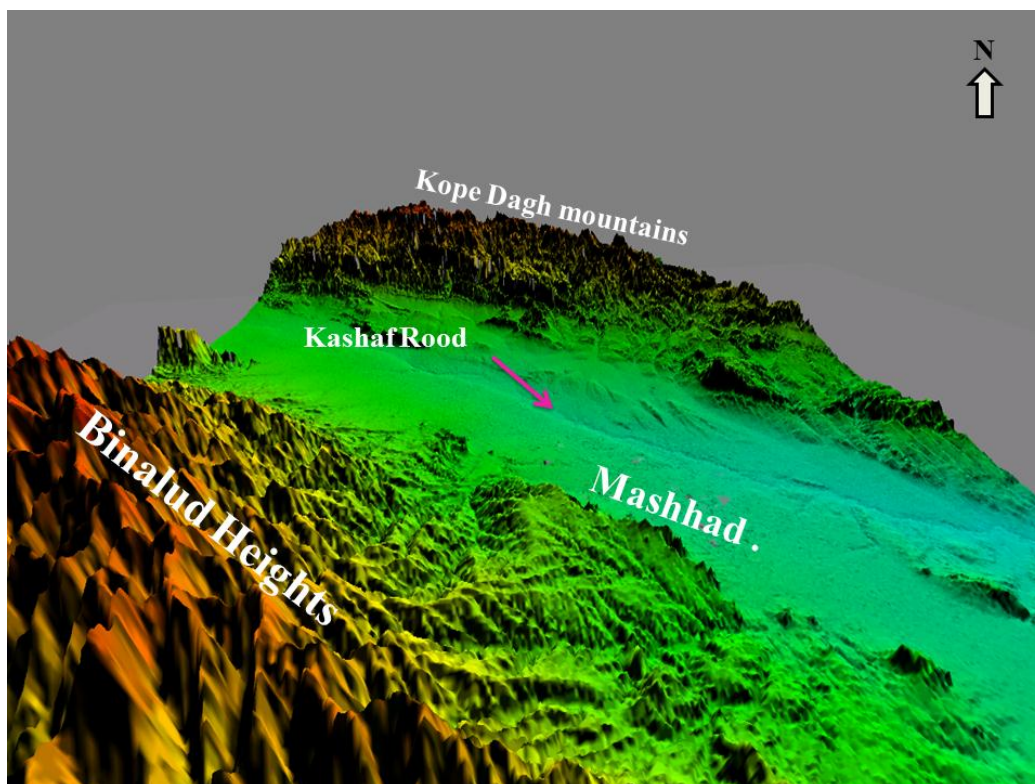
بر اساس جدول مذکور نیاز آبی شهر مقدس مشهد در سال ۱۳۹۰ معادل ۲۳۶ میلیون متر مکعب و در سال ۱۴۰۰ معادل ۳۰۴ میلیون متر مکعب و در سال ۱۴۱۰ معادل ۳۸۵ میلیون متر مکعب در سال برآورد می‌گردد. در مقابل توان تولید آب برای شهر مشهد در حدود ۲۰۰ میلیون متر مکعب ثابت خواهد ماند. به این ترتیب تا سال ۱۴۱۰ باید حدود ۱۸۵ میلیون متر مکعب کمبود آب این شهر با برنامه‌ریزی دقیق و حساب شده به صورتهای گوناگون تأمین شود. در مورد آینده تأمین آب شرب شهر مشهد، در صورتی که امکان تأمین آب شرب از طریق سد دوستی به علت فرسودگی شبکه انتقال شهری میسر نگردد، استفاده از طرحهای دیگر الزامی است. این طرحها عمدتاً متکی بر جایگزینی پساب تصفیه شده فاضلاب شهری با آب کشاورزی و همچنین تغذیه آبخوان شهر مشهد به منظور تأمین آب شرب شهر می‌باشند. اجرای طرح شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری علاوه بر ارتقاء سطح بهداشت عمومی منطقه از اتلاف آب که در این منطقه ارزش حیاتی دارد، جلوگیری می‌نماید. از این طریق حدود ۸۰ درصد آب مصرفی در داخل شهر قابل بازیافت بوده و می‌تواند در امر کشاورزی و تغذیه آبخوان منطقه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از افزایش سرعت فرورنشست منطقه با توسعه طرح جمع‌آوری فاضلاب کاسته خواهد شد.

## فصل دوم: زمین شناسی و هیدروژئولوژی

### ۲-۱- زمین شناسی منطقه

محدوده مطالعاتی مشهد به لحاظ جایگاه زمین شناسی در حد فاصل دو زون زمین شناسی کپه داغ و بینالود واقع می‌شود. زون بینالود با روند شمال غرب- جنوب شرق در امتداد زون البرز شرقی است که تا کشور افغانستان امتداد می‌یابد. برخی این زون را به واسطه شباهت رخساره‌های پالئوزوئیک آن زون تدریجی بین ایران مرکزی و البرز به حساب می‌آورند و برخی دیگر آن را جزء ایران مرکزی می‌دانند. رخساره‌های این زون شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی می‌باشد که طی دوره‌های مختلف زمین شناسی تحت تأثیر حرکات تکتونیکی قرار گرفته‌اند. زون کپه داغ که قسمت شمالی دشت مشهد را شامل می‌شود، با روند شمال غرب- جنوب شرق کل بخش شمالی حوضه تلفیق قره‌قوم را شامل می‌شود. به طور کلی در پالئوزوئیک، شمال شرق ایران بخشی از اقیانوس بزرگ پالئوتتیس بوده که توده‌های لیتوسفری ایران و توران را از یکدیگر جدا نموده است. احتمالاً در اواخر پرمین بر اثر فاز کوهزایی هرسی نین فرورانش پوسته اقیانوسی پالئوتتیس، زیر پوسته ایران آغاز شده و در تریاس میانی این دو پوسته قاره‌ای به یکدیگر برخورد نموده‌اند. پس از پایان برخورد فرسایش شدید در منطقه حاکم گشته و رخساره‌هایی کم عمق (شیل و ماسه سنگ‌های سازند کشف رود) به طور دگر شیب بر روی تشکیلات قدیمی‌تر نهشته شده‌اند. پس از این زمان زون بینالود بالا آمده و حوضه رسوبی کپه داغ به صورت یک حوضه رسوبی مستقل درآمده و رسوبات دوران دوم و سوم زمین‌شناسی با ضخامت زیاد در یک محیط آرام تکتونیکی نهشته شده‌اند. در زون بینالود شواهد مربوط به سه فاز دگرگونی ناحیه‌ای و دو مرحله گرانیته‌زایی شناسایی شده است. فاز دگرگونی و گرانیته‌زایی اولیه را به فاز کوهزایی هرسی نین مرتبط می‌دانند. پس از آن در کوهزایی کیمبرین پیشین مرحله دوم دگرگونی و گرانیته‌زایی رخ داده است. در زون زمین شناسی کپه داغ (ارتفاعات

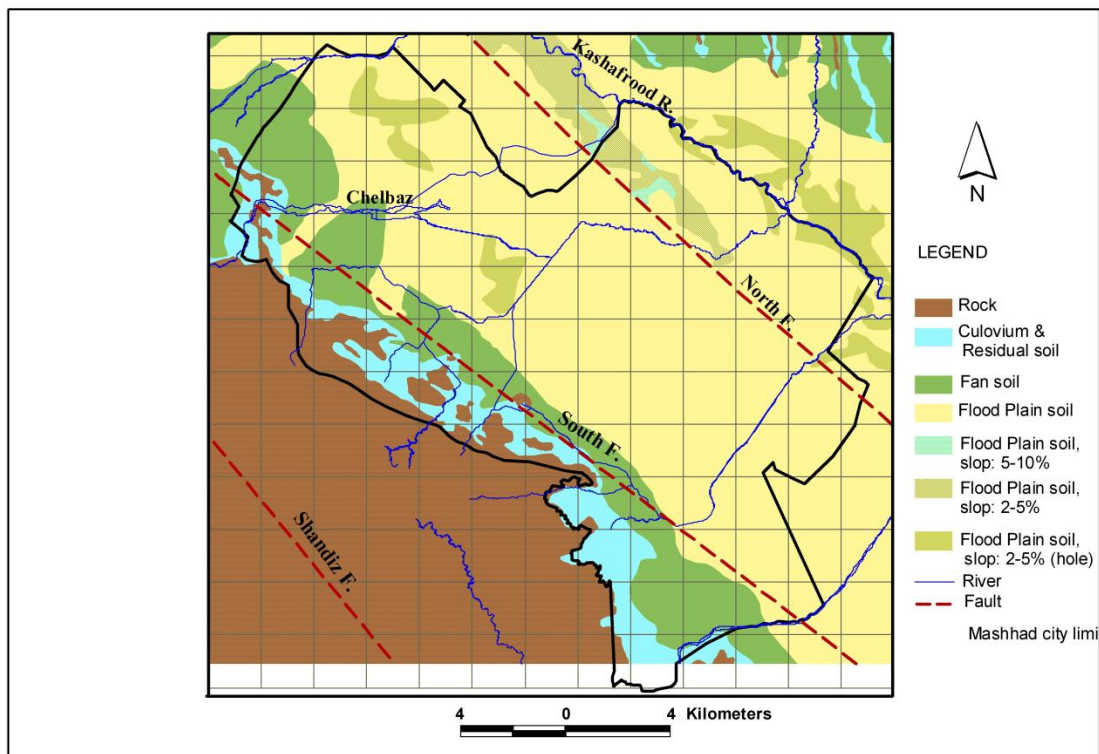
شمالی) شواهد مربوط به ۱۸ فاز خشکی زایی مشاهده می‌گردد که در محدوده مطالعاتی مشهد نهشته شده‌اند. سنگهای رسوبی محیط خشکی و مردابی در بستره وسیعی از ارتفاعات شمالی (سازند شوربجه) نشان از پسروی دریا می‌باشد. در آغاز ائوسن و همزمان با فعالیت‌های گسترده آتشفشانی در ایران مرکزی، حوضه رسوبی کپه داغ نیز بالا آمده و پس از آن تا به امروز حوضه رسوبی کپه داغ خشک بوده است. این خشک‌زایی با فاز کوهزایی پیره‌نین همراه بوده است. چین خوردگی رسوبات کنگلومرایی و نهشته‌های نئوژن نشان از فعالیت این فاز کوهزایی می‌باشد. پس از آن فعالیت‌های تکتونیکی به صورت حرکت در امتداد گسل‌های اصلی منطقه و تراست شدگی واحدهای زمین‌شناسی به وقوع پیوسته است (درویش زاده، ۱۳۷۰). به دلیل سرگذشت زمین‌شناسی متفاوت این دو زون (پس از دوران دوم زمین‌شناسی تاکنون) خصوصیات زمین‌ساختی و چینه‌شناسی رخنمون یافته در سطح محدوده مطالعاتی مشهد از تنوع قابل توجهی برخوردار می‌باشد (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲- ژئومورفولوژی دشت مشهد (Global Mapper12)

## ۲-۲- ریخت شناسی منطقه

ناهمواری‌های منطقه بر اساس میزان ارتفاع و خصوصیات فیزیوگرافی و ریخت شناسی تقسیم شده است. حوضه آبریز کشف‌رود از نظر مورفولوژی شامل سه واحد متمایز می‌باشد که به موازات هم از شمال غرب به طرف جنوب شرق امتداد دارد (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲- نقشه پهنه بندی شهر مشهد از نظر محیط رسوبی (حافظی مقدس، ۱۳۸۶)

## واحد کوهستانی

در منطقه مورد مطالعه بیشتر از ۶۰ درصد وسعت حوضه را ناهمواری‌های کوهستانی تشکیل می‌دهند که دارای بیشترین عوارض مورفولوژیکی است. بر اساس موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی (شهر مشهد) به دو ناحیه تقسیم شده است.

### الف- ناحیه شمالی

سیستم ناهمواری‌های کوهستانی منطقه اکثراً از سنگهای رسوبی مختلف و سنگ آهک تشکیل شده است. این ناحیه شامل، کوههای هزارمسجد و الله اکبر با سیمای صخره‌ای و ستیغ‌های مرتفع می‌باشد که حداکثر ارتفاع در این ناحیه ۲۸۹۰ متر و حداقل آن ۱۰۰۰ متر است. وجود ساخت‌های تکتونیکی و اختلاف درجه حرارت زیاد در فصول مختلف سال منجر به هوازگی و فرسایش مکانیکی سنگها شده است. حاصل آن دره‌های پرپیچ و خم با شیب تند و عمیق می‌باشد که در امتداد شکستگی‌ها و ساختارهای زمین شناسی ایجاد گردیده‌اند.

### ب- ناحیه جنوبی

ناحیه جنوبی شامل رشته کوههای بینالود می‌باشد که به موازات ناحیه شمالی از شمال غرب به جنوب شرق امتداد دارد. حداکثر ارتفاع در قله بینالود ۳۲۴۹ متر و حداقل آن در مجاورت با ناحیه مرکزی حدود ۱۰۰۰ متر است. دره‌ها با توجه به جنس سازندهای زمین شناسی که عمدتاً شامل فیلیت‌های مشهد می‌باشد به موازات هم در امتداد جنوب غرب به سمت شمال شرق کشیده شده وارد ناحیه میانی می‌شود. این آبراهه‌ها نسبتاً وسیع بوده و شیب دره‌ها با توجه به طول آنها نسبت به ناحیه شمالی کمتر است.

### واحد مخروط افکنه‌ای

در دهانه اغلب آبراهه‌ها و رودخانه‌های فرعی منطقه، رسوبات مخروط افکنه، شامل مخلوطی از ذرات و قطعات سایش یافته از سنگهای مختلف قابل مشاهده می‌باشد که در دهانه ورودی آبراهه به رودخانه اصلی به چشم می‌خورند، گسترش مخروط افکنه‌ها در منطقه نسبت به واحدهای دیگر کمتر است ولی به علت گسترش آبراهه‌های شاخه شاخه بر روی آنها و نیز پیشروی‌شان به سمت دشت از اهمیت خاصی برخوردارند.

## واحد دشت

ناحیه مرکزی شامل دشت وسیع مشهد می‌باشد با توجه به اینکه واحد دشت کمتر از ۳۰ درصد وسعت حوضه آبریز کشف رود را می‌پوشاند و از وسعت چندانی برخوردار نمی‌باشد، در بین دو رشته ارتفاعات ذکر شده قرار گرفته و این واحد از انتهای مخروط افکنه‌ها به سمت محور رودخانه اصلی در مرکز دشت ادامه می‌یابد. در این قسمت برجستگی‌های موضعی خاصی مشاهده می‌شود که در اثر فعالیت‌های رودخانه‌ای یا بادی شکل گرفته‌اند. سطح دشت عمدتاً از رسوبات دانه ریز سیلتی و رسی عهد حاضر تشکیل یافته و بستر فعالیت حمل و نقل مواد توسط آب است. قسمت میانی در حاشیه کوه‌ها نسبتاً ناهموار بوده و از مخروط افکنه و تراس‌های آبرفتی همراه با واریزه‌ها تشکیل گردیده است و فرسایش در این بخش‌ها در مسیر رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، بیشتر از نوع کناری در محیط است. آبخوان اصلی مشهد در این ناحیه قرار گرفته و رشد اقتصادی و اجتماعی منطقه وابسته به آن است (سازمان آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، ۱۳۸۹).

## ۲-۳- زمین شناسی ساختمانی

فعالیت‌های تکتونیکی که متأثر از جنبش‌های جهانی و ورقه‌های لیتوسفری می‌باشد عامل اصلی تعیین‌کننده لیتولوژی و مورفولوژی تشکیلات زمین شناسی رخنمون یافته در سطح محدوده‌های مطالعاتی می‌باشد. به طور کلی گسله‌های رانده و صفحات رورانده عمده‌ترین ساخت‌های زمین شناسی ناحیه مشهد هستند. تقریباً تمامی گسله‌های رانده، روند شمال غربی \_ جنوب شرقی دارند و سوی حرکت در لبه آنها از شمال و شمال غرب به سمت جنوب و جنوب شرقی است. چین‌ها تقریباً در تمامی انواع سنگها مشاهده می‌شوند. چین‌های موجود در جنوب مشهد عمدتاً از نوع برگشته و خوابیده هستند و وجودشان با فعالیت گسله‌های تراستی و حرکت صفحات رورانده در ارتباط مستقیم بوده است. برگشتگی آنها به سمت جنوب و جنوب غربی و شیب سطح محوری آنها به سمت شمال و شمال شرقی است. درزها نیز از ساخت‌های متداول موجود در کلیه سنگهای رسوبی، آذرین و دگرگونی

منطقه هستند که حاصل رفتار شکننده در قبال نیروهای وارد بر آنهاست.

گسله‌های عمده و مهم این ناحیه عبارتند از:

گسله جغری: گسله‌ای رورانده است و در شمال منطقه تبادکان (حدوداً ۳۵ کیلومتری شمال شرقی مشهد) قرار دارد.

گسله خیرآباد: یک گسله رورانده و دارای شکستگی‌های زیاد است که امتداد کلی آن شمال غرب- جنوب شرق بوده و گسله عمده و اصلی در ناحیه (حدود ۳۰ کیلومتری) شمال شرقی مشهد است. گسله مانسار: این گسل شاخه فرعی از گسله خیرآباد است.

گسله شاندریز - سنگ بست: این گسله عمده ترین گسله جنوب مشهد است که به صورت خط انفصال دامنه شمالی بینالود و دشت مشهد می‌باشد و در واقع محل مفصلی صفحه توران و ایران می‌باشد. این گسله رورانده است و امتداد آن شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد.

از دیگر گسله‌های موجود در گستره شهر مشهد به گسله‌های استاج و زکریا می‌توان اشاره کرد. بیشتر گسله‌های بررسی شده دشت مشهد گسله‌های بنیادی کواترنر بوده و گروه بزرگی از آنها جزو گسله‌های میان برجستگیها و فرونشستها، میان کوه و دشت و گسله‌های سازنده پستی و بلندیهای روی زمین و در پیوند با پیدایش کوهها و دشتهاست، با توجه به اینکه بیشتر گسله‌های ایران زمین، گسله‌های کوهپایه‌ای است (بربریان و همکاران، ۱۳۷۸; Berberian, 1983).

بنابراین خطر اصلی زمین لرزه‌ای از جنبش دوباره این گسلها در دشت مشهد خواهد بود. سازوکار گسله‌های اصلی شناخته شده در دشت مشهد فشاری بوده و یا مؤلفه مهم فشاری دارند. این نکته از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا گسله‌های فشاری (در مقایسه با گسله‌های راستالغز و کششی) پرنرزی ترند (Sibson, 1975) و دوره بازگشت زمین لرزه‌ها در راستای آنها نسبت به طولشان و شتاب گرانش زمین در طول آنها بیشتر بوده و می‌توانند زمین لرزه‌های بزرگ و ویرانگری را به وجود آورند (Berberian et al., 1981).

## ۲-۴- چینه شناسی

چگونگی موقعیت و جنس سازندهای زمین شناسی در زونهای ساختاری بیانگر وضعیت جغرافیایی گذشته، مورفولوژی، زمین ساخت و حوادث اتفاق افتاده در دورانهای زمین شناسی می باشد. سازندهای زمین شناسی نقش متفاوتی بر کیفیت و کمیت منابع آب دارند. در این بخش با تأکید بر خصوصیات سنگ شناسی، گسترش سازندها و نقش آنها بر منابع آب وضعیت چینهها از قدیم به جدید به شرح زیر مورد بررسی قرار می گیرد (سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۰).

### پالئوزوئیک

قدیمی ترین تشکیلات زمین شناسی رخنمون یافته در سطح محدوده مشهد شامل: سنگ آهک و دولومیت‌های متبلور سازند بهرام (Db) می باشد که در خط الراس ارتفاعات بینالود و حاشیه جنوب غربی منطقه با وسعتی حدود ۳۶ کیلومتر مربع در سطح ظاهر شده‌اند گرچه این تشکیلات کارستی می باشد (غار مغان) ولی به واسطه گسترش محدود از پتانسیل آبی اندکی برخوردارند. مجموعه‌ای از سنگهای رسوبی شامل ماسه سنگ، آهک متبلور و رادیولاریت و سنگهای اولترابازیک و سرپانتینیت در جنوب غربی و غرب مشهد و در حاشیه آبخوان آبرفتی این دشت در سطح رخنمون یافته‌اند. این سنگها را فصل مشترک (زون مفصلی) دو زون کپه داغ و بینالود می دانند این مجموعه به سن پرمین در گستره‌ای معادل ۳۴/۸ کیلومتر مربع مشاهده می شوند. لیتولوژی نفوذ ناپذیر و گسترش اندک این تشکیلات دلالت بر پتانسیل آبی ناچیز آنها می نماید.

### مزوزوئیک

بخش اعظم سطح محدوده مشهد را رسوبات دوران دوم زمین شناسی (ژوراسیک و کرتاسه) به خود اختصاص داده‌اند. واحدهای سنگی این دوران در ارتفاعات بینالود و در غرب شهر مشهد عمدتاً آذرین و دگرگونی بوده و در بخشهای شمالی و شرقی (حوضه رسوبی کپه داغ) سنگهای رسوبی



می‌باشد. سنگهای متعلق به تریاس در سطح محدوده مطالعاتی مشهد رخنمون نداشته و اطلاعات زیادی خصوصاً از تریاس زیرین و میانی در اختیار نیست. رسوبات ژوراسیک در ارتفاعات غرب دشت مشهد (بینالود) شامل: شیل و فیلیت (فیلیت‌های مشهد)، ماسه سنگ، شیل و کنگلومرا، سنگ آهک، مارن خاکستری رنگ، سنگ آهک توده ای و مطبق روشن رنگ می‌باشد. فیلیت‌های مشهد در گستره وسیعی (بیش از ۱۰۴۳ کیلومتر مربع) از ارتفاعات بینالود در غرب شهر مشهد رخنمون دارند. به دلیل مورفولوژی مرتفع و برخورداری از نزولات جوی مناسب رودخانه‌های بسیاری از این تشکیلات سرچشمه می‌گیرند و نقش قابل توجهی در تامین آب و تغذیه آبخوان آبرفتی دشت مشهد دارند. علاوه بر این به دلیل وجود سطوح ناپیوستگی (شکستگی‌ها، گسلها و سطوح شیستوزیته) نفوذپذیری این تشکیلات افزایش یافته و چشمه‌ها و قنات بسیاری از این واحدها تغذیه می‌شوند. رسوبات آواری ژوراسیک شامل: ماسه سنگ، شیل و کنگلومرا می‌باشد که در گستره‌ای معادل ۷۸/۸ کیلومتر مربع و با سطح گسلی در ارتفاعات بینالود و جنوب شهر مشهد در سطح رخنمون دارند. این رسوبات به دلیل رخنمون اندک از پتانسیل آبی ناچیزی برخوردارند. در ژوراسیک بالایی نیز تشکیلات کربناته و سنگ آهک‌های توده‌ای و مطبق روشن رنگ در زون بینالود نهشته شده‌اند (معادل سازند مزدوران در کپه داغ). این تشکیلات رخنمون وسیعی در زون بینالود (بخش شمال غربی محدوده مطالعاتی مشهد) دارند. رودخانه اخلمد مهمترین رودخانه سرچشمه گرفته از این تشکیلات است. رخنمون وسیع، لیتولوژی کربناته و توسعه مجاری کارستی در برخی از مناطق نشان از پتانسیل آبی قابل توجه با کیفیت مناسب در این رسوبات می‌نماید. بررسی زمین شناسی رشته ارتفاعات بینالود در سطح محدوده مشهد نشان می‌دهد در دو منطقه، سنگهای آذرین به دو شکل متفاوت در سطح دیده می‌شوند. دسته اول در جنوب شهر مشهد رخنمون وسیعی از توده پلوتونیک (زون مفصلی) شامل: گرانیت، آپلیت و پگماتیت از کوه هوهویی و منطقه خواجه مراد تا وکیل آباد مشاهده می‌شود. محققین نحوه شکل‌گیری این توده را به سه فاز گرانیت‌زایی مربوط می‌دانند که باعث دگرگونی همبری واحدهای رسوبی منطقه گردیده است. این تشکیلات دارای نفوذپذیری اندکی بوده و

چشمه‌هایی با آبدهی ناچیز در آنها دیده می‌شود. واحد آذرین دسته دوم در شمال غربی محدوده مطالعاتی و در منطقه (دوغایی) کوه خواجه علی مشاهده می‌گردد. این واحدهای آذرین شامل سنگهای آذرین بیرونی (داسیت ، توف و برش) می‌باشد. به دلیل مقاومت اندک این تشکیلات در مقابل هوازدگی و جوینت‌ها و شکافهای موجود، نفوذپذیری این سنگها افزایش یافته و چشمه‌های متعددی در آنها وجود دارد. سن این تشکیلات نئوژن تعیین گردیده است. قدیمی‌ترین تشکیلات زمین شناسی رخنمون یافته در ارتفاعات شمالی محدوده مطالعاتی مشهد (زون کپه داغ) شامل شیل و ماسه سنگ‌های خاکستری تیره سازند کشف رود به سن ژوراسیک زیرین می‌باشد. رخنمون این رسوبات در سطح محدوده مشهد بسیار اندک و محدود به گسلهای اصلی موجود می‌باشد.

بخش اعظم ارتفاعات شمالی محدوده مشهد را سنگ آهکهای میکریتی و مارنی (سازند چمن بید) و سنگ آهکهای نخودی روشن رنگ (تشکیلات مزدوران) به خود اختصاص داده‌اند (مساحت رخنمون این واحدها ۲۸۰۷ کیلومتر مربع است). این واحدها با مورفولوژی صخره ساز ستیغ ارتفاعات منطقه را عمدتاً تشکیل داده و در هسته تاقدیسهای موجود با امتداد شمال غرب - جنوب شرق در سطح رخنمون یافته‌اند. به دلیل قابلیت کارستی شدن این تشکیلات (لیتولوژی کربناته) نفوذپذیری این واحدها عمدتاً زیاد بوده و چشمه‌هایی با آبدهی قابل توجه (بیش از ۱۰۰ لیتر بر ثانیه) در آنها مشاهده می‌گردد. تاکنون مطالعات گوناگونی جهت ارزیابی پتانسیل آبی این تشکیلات انجام شده و تعدادی چاه آهکی نیز عمدتاً جهت تامین آب شرب در این رسوبات حفاری گردیده است. در کرتاسه زیرین شاهد بالآمدگی حوضه و نهشته شدن رسوبات آواری شامل: ماسه سنگ و شیل‌های قرمز رنگ سازند شوربچه در منطقه هستیم. این سازند به دلیل نفوذپذیری اندک عمدتاً نقش لایه محدود کننده آبخوانهای آهکی (مزدوران و تیرگان) منطقه را ایفا می‌نماید. این سازند در حاشیه آبخوان آبرفتی در محدوده رادکان و بهمن جان رخنمون وسیعی داشته و علاوه بر ایجاد مانع جهت تغذیه مناسب آبخوان احتمالاً سنگ کف آبخوان آبرفتی در این منطقه می‌باشد. بر روی واحد آواری شوربچه به طور هم‌شیب سنگ آهکهای قهوه‌ای و خاکستری روشن (آهکهای تیرگان) نهشته شده است. این تشکیلات

کربناته در شمال غربی ارتفاعات و عمدتاً در حاشیه ناودیس‌های موجود رخنمون دارند. این تشکیلات نیز دارای موفولوژی صخره ساز بوده و به دلیل لیتولوژی کربناته و پتانسیل کارستی شدن توانایی تشکیل آبخوان آهکی را در منطقه دارند. مارنهای آبی و خاکستری همچنین شیلهای متعلق به سازند سرچشمه نیز بر روی تشکیلات کربناته تیرگان و در مرکز سنکلینالها رخنمون محدودی دارند. این رسوبات عمدتاً دارای نفوذپذیری اندکی بوده و حد فوقانی آبخوان آهکی تیرگان را تشکیل می‌دهند.

### سنوزوئیک

دوران سوم زمین شناسی به سه دوره پالئوژن، نئوژن و کواترنر قابل تقسیم است. رخساره‌ها و تشکیلات متعلق به پالئوژن در سطح محدوده مشهد رخنمون ندارد.

### الف- نئوژن

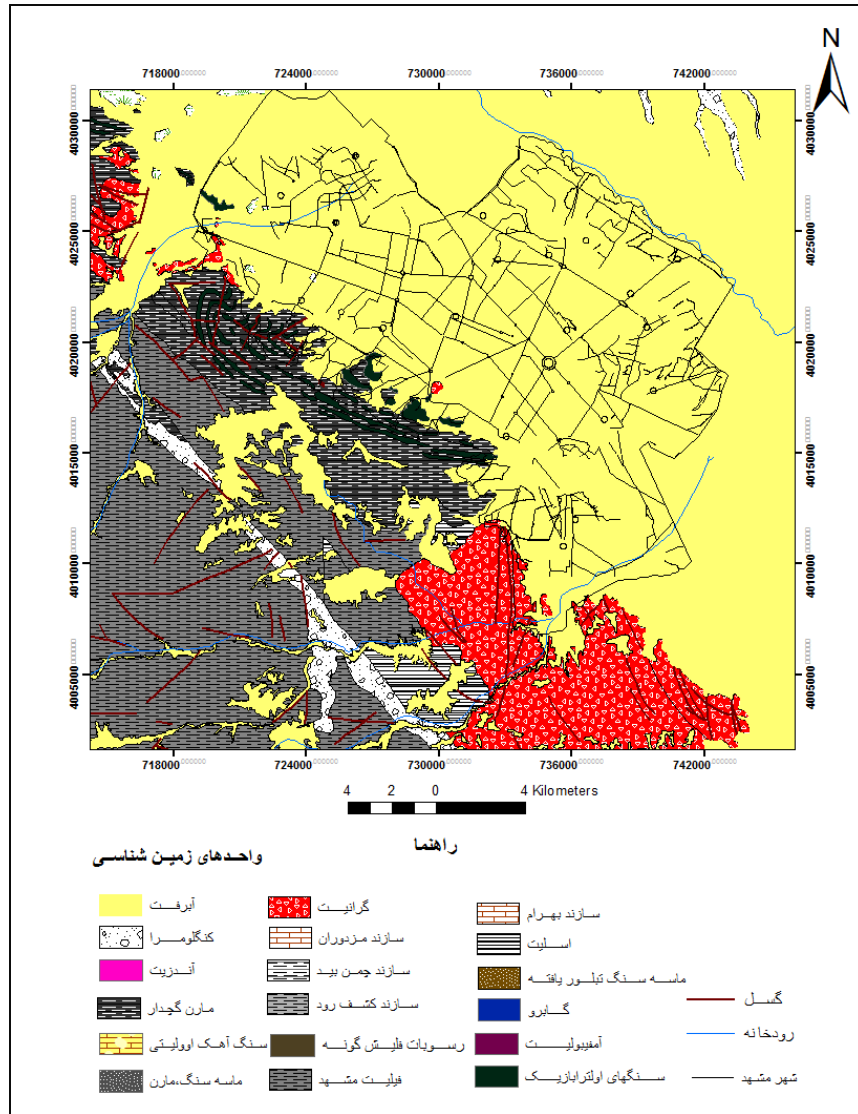
تشکیلات نئوژن عمدتاً شامل: واحدهای مارنی قرمز رنگ گچ دار می‌باشند که به دلیل ریزدانه بودن و دارا بودن املاح تبخیری نقش کمی و کیفی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه دارند. رخساره‌های مذکور در سه منطقه عمده در سطح محدوده مشهد دیده می‌شوند. شمال غربی آبخوان آبرفتی (منطقه آلماجق) و در ارتفاعات شمال شرقی دشت مشهد، در منطقه سرخ‌ده و تبادکان همچنین در حاشیه آبخوان آبرفتی مشهد (منطقه کارخانه سیمان) و جنوب شرق آن (حد فاصل دو محدوده مشهد و نریمانی) گستره قابل توجهی از رسوبات قرمز رنگ نئوژن قابل مشاهده است. تشکیلات رسی و مارنی نئوژن به دلیل نفوذپذیری اندک (در مناطق ذکر شده) احتمالاً سنگ کف آبخوان آبرفتی را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این در طی نئوژن پایانی رسوبات آواری (کنگومرایی) نیز نهشته شده که در حاشیه جنوب شرقی آبخوان آبرفتی دشت مشهد رخنمون قابل توجهی داشته و به صورت پراکنده در بخش شرقی آبخوان آبرفتی نیز مشاهده می‌شوند.

## ب- کواترنر

رسوبات کواترنر عمدتاً شامل رسوبات تحکیم نیافته آواری می‌باشند که حاصل فرسایش ارتفاعات و تشکیلات سنگی قدیمی‌تر بوده و در مناطق پست و فرو افتاده حوضه تجمع یافته‌اند. این رسوبات در سطح محدوده مشهد از قدیم به جدید شامل، تراسها یا پادگانه‌های آبرفتی مرتفع ( $Q^{t1}$ ) مخروط افکنه‌ها و آبرفتهای جوان ( $Q^{t2}$ ) آبرفتهای جدید رودخانه‌ای ( $Q^{al}$ ) و پهنه‌های سیلتی و رسی ( $Q^f$ ) می‌باشد. آبرفتهای مرتفع قدیمی عمدتاً درشت دانه با شیب قابل توجه در حاشیه ارتفاعات نهشته شده‌اند. این رسوبات از نفوذپذیری بالایی برخوردار بوده و در تغذیه آبخوان آبرفتی نقش مهمی ایفاء می‌نمایند. مهمترین گستره آبرفتهای قدیمی در حد فاصل شاندیز تا جماب در حاشیه ارتفاعات بینالود و آبخوان دیده می‌شود.

مخروط افکنه‌ها و رسوبات جوان آبرفتی تقریباً تمامی بخش فروافتاده مرکزی دشت مشهد را به خود اختصاص می‌دهند این رسوبات در حاشیه ارتفاعات درشت دانه و از نفوذ پذیری بالایی برخوردار بوده و آبخوان آبرفتی دشت مشهد را در خود جای داده‌اند. شهر مشهد و آبادیهای بسیاری بر روی این رسوبات قرار داشته و در حال حاضر بیش از شش هزار حلقه چاه در این رسوبات حفاری گردیده است. رسوبات جوان رودخانه‌ای نیز بستر مسیل‌های اصلی موجود در منطقه را تشکیل می‌دهند. این رسوبات درشت دانه و از نفوذپذیری بالایی برخوردارند.

علاوه بر این نقش بسیار مهمی در تغذیه آبخوان آبرفتی از سیلابهای موجود بر عهده دارند. بیشترین گستره این رسوبات در بستر سیلابی رودخانه شاندیز، گلکان، فریزی، کارده و ارداک دیده می‌شود. در مناطقی که شیب توپوگرافی در سطح زمین کاهش می‌یابد. رسوبات ریزدانه رسی و سیلتی در پهنه‌های اندک نهشته شده‌اند. نفوذپذیری سطحی آبرفت در این مناطق اندک بوده و از کیفیت آب زیر زمینی منطقه کاسته می‌شود (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳- نقشه (GIS) زمین شناسی شهر مشهد برگرفته از داده‌های آب منطقه‌ای

## ۲-۵- بافت خاک مشهد

یکی از ویژگی‌های فیزیکی خاک بافت آن است. مقدار نسبی شن، ماسه، سیلت و رس بافت خاک را تشکیل می‌دهند. نهشته‌های تشکیل دهنده دشت مشهد عمدتاً متأثر از رسوبگذاری رودخانه کشف رود و آبراهه‌های فرعی که از ارتفاعات جنوبی سرچشمه می‌گیرد، می‌باشد. در دامنه‌های شمالی و جنوبی دشت پادگانه‌های آبرفتی قدیمی به صورت نهشته‌های پر حجمی دیده می‌شوند. در ابتدای دره‌های فرسایشی که در شمال و جنوب دشت فراوانند، مخروط افکنه‌های کوچک و بزرگ به وجود

آمده است که مهمترین آنها مخروط افکنه طرق، طرqbه، شانديز، کارده و رادکان را می‌توان نام برد. ضخامت آبرفت دشت مشهد در نقاط مختلف متفاوت است. در میانه دشت مشهد ضخامت آبرفت نسبتاً زیاد و در انتهای آن به واسطه بالا بودن سنگ کف، ضخامت آبرفت کم می‌گردد. آبرفت دشت مشهد که با شیب نسبتاً ملایمی از ارتفاعات اطراف به طرف مرکز و خط القعر دشت کشیده می‌شود دارای ضخامتی از حداقل چند متر در کناره‌ها تا بیش از ۲۵۰ متر در مرکز شهر می‌باشد و متوسط عمق آن ۱۲۰ متر گزارش شده است (حافظی مقدس، ۱۳۸۶). با توجه به منشأ رسوبگذاری از حاشیه ارتفاعات جنوبی به طرف مرکز دشت و همچنین از غرب به سمت شرق اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد و بافت خاک ریزتر می‌شود. بافت آبرفتی با توجه به لاگ زمین شناسی چاهها از ۲۰ درصد رس، ۳۵ درصد ماسه و بقیه شن تشکیل شده است و از لحاظ ذخیره آب زیرزمینی مطلوب می‌باشد. در محدوده شهر مشهد بافت متغیری مشاهده می‌شود، به طوری که بافت خاک در سمت غرب درشت دانه (شنی) و به سمت شرق به ترتیب ماسه‌ای، سیلت و ماسه سیلتی (در شرق) تغییر می‌کند. همچنین در جنوب بافت خاک شنی و به سمت شمال به ترتیب ماسه‌ای، سیلت و ماسه سیلتی می‌باشد. به طور کلی بافت خاک در سطح شهر تابعی از فاصله تا مسیلهای اصلی است. از نظر منشأ رسوبگذاری نهشته‌های شهر مشهد را می‌توان به بخش‌های جدا گانه زیر تقسیم نمود:

#### الف- نهشته‌های حاشیه جنوبی شهر

نهشته‌های پای ارتفاعات جنوبی شهر از نوع دامنه‌ای و مخروط افکنه‌ای می‌باشد. مسیلهایی که از ارتفاعات بینالود سرچشمه می‌گیرند در ابتدای ورود به دشت مشهد مخروط افکنه‌های کوچکی تشکیل داده‌اند. از بهم پیوستن این مخروط افکنه‌ها رسوبات درشت دانه شنی به عرض حدود یک کیلومتر در حاشیه ارتفاعات جنوبی تشکیل شده است. با دور شدن از ارتفاعات شکست مشخصی در شیب زمین بوجود آمده و اندازه دانه‌ها در حد ماسه تقلیل یافته است. ضخامت رسوبات در حاشیه ارتفاعات کمتر از یک متر است در حالی که در داخل مسیلهها به بیش از ۱۰ متر می‌رسد. با دور شدن

از ارتفاعات ضخامت رسوبات نیز افزایش می‌یابد. در محدوده رضا شهر بطور استثناء ضخامت قابل توجهی رسوبات ریز دانه گچ دار وجود دارد. نهشته‌های گچ حتی در داخل درز و شکاف توده سنگهای اولترابازیک نیز مشاهده می‌گردد. به نظر می‌رسد در گذشته در این محدوده حوضه رسوبی کم عمقی وجود داشته است که نهشته‌های تبخیری و خاک ریز دانه در آن بجا گذاشته شده است. در حال حاضر افق دیگری از خاک در حاشیه ارتفاعات جنوبی شهر مشهد به ویژه در حاشیه مسیله‌ها وجود دارد که نخاله ساختمانی و خاک دستی می‌باشد. ضخامت این افق خاک در برخی قسمت‌ها به بیش از ۱۰ متر نیز می‌رسد.

#### ب- نهشته‌های رسوبی غرب مشهد

زمینهای غرب مشهد شامل اراضی الهیه، امامیه، قاسم آباد، آزاد شهر و بخشی از سجاد متأثر از رسوبگذاری مسیله‌هایی می‌باشد که از رخنمونهای دگرگونی ارتفاعات جنوب غرب مشهد سرچشمه می‌گیرد. مسیله‌های مانند کال شاندیز، چهل بازه و منزل آباد که سرشاخه‌های کشف رود نیز می‌باشند که به تبعیت از شیب عمومی توپوگرافی با روند شمال شرقی به کشف رود می‌ریزند. با توجه به نزدیک بودن به ارتفاعات، نهشته‌های این قسمت عموماً شنی می‌باشد. در اطراف مسیل چهل بازه پهنه‌های ماسه‌ای وجود دارد که مربوط به زمان طغیان آن است.

#### ج- نهشته‌های رسوبی مرکز مشهد

رسوبات مرکز شهر مشهد نیز مربوط به مسیله‌های کال خیام، چایش و اقبال می‌باشد که از ارتفاعات جنوبی و جنوب غربی سرچشمه گرفته و نهایتاً به کشف رود می‌ریزند. با توجه به فاصله از ارتفاعات جنوبی و همچنین جنوب غربی رسوبات در مرکز شهر مشهد ریز دانه‌تر می‌باشد. در بخش مرکزی تناوب سیلت، رس و ماسه را داریم. در حاشیه مسیله‌ها درصد ماسه بیشتر است ولی با دور شدن از

مسیلهای درصد سیلت و رس افزایش می‌یابد. با توجه به جابجایی رودخانه‌ها بر روی دشت سیلابی در گذشته، در مقطع عمقی ناهمگنی در بافت خاک وجود دارد.

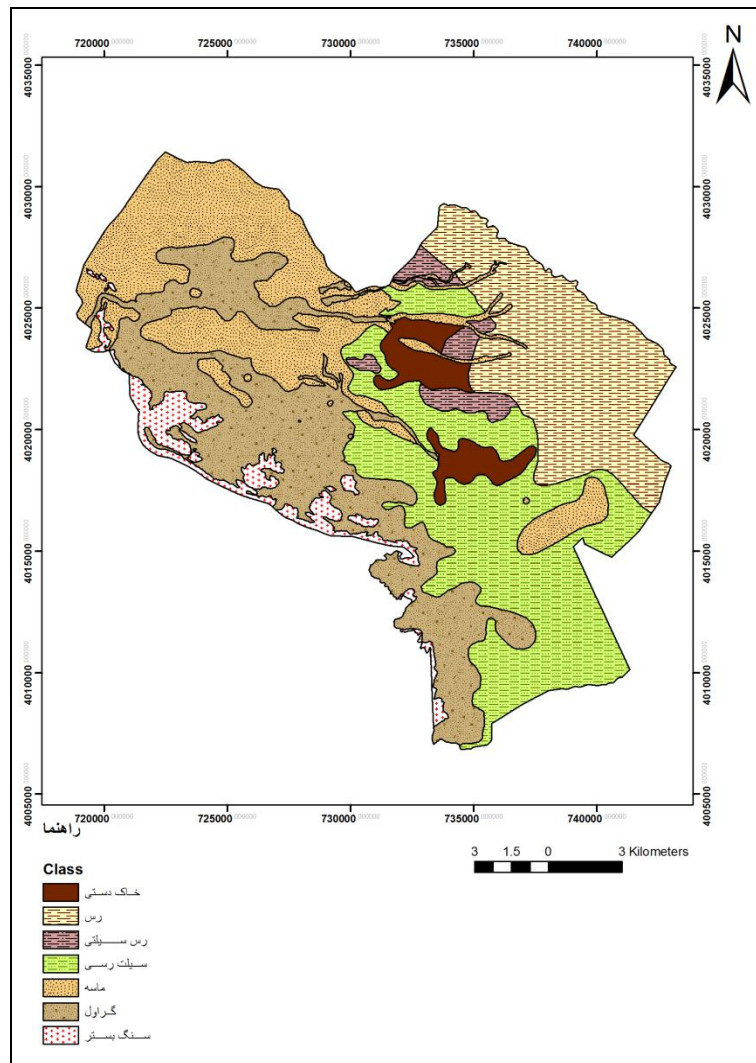
#### د- نهشته‌های شرق مشهد

مهمترین مسیل در شرق مشهد رودخانه طرق می‌باشد. مسیر رودخانه طرق در حال حاضر به سمت شرق منحرف شده و در خارج از شهر مشهد قرار دارد ولی در گذشته مسیرهای دیگری را داشته که به مرور زمان تغییر کرده است. بافت خاک در شرق مشهد نیز با توجه به فاصله زیاد از ارتفاعات بجز در حاشیه مسیلهای سیلتی-رسی می‌باشد.

#### ه- نهشته‌های شمال و شمال شرق مشهد

بخش شمالی دشت مشهد انتهای دشت سیلابی محسوب می‌شود و رسوبات ریز دانه سیلتی-رسی در این قسمت بجا مانده است. به نظر می‌رسد عملکرد گسله شمال مشهد و بالاآمدگی بخش شمالی در اثر عملکرد گسله مزبور ارتباط رسوبی بین دشت مشهد و کشف رود را قطع نموده است. به طوری که در عمق به نهشته‌های درشت دانه کف کانال برخورد می‌گردد (شکل ۲-۴). در حال حاضر مسیلهای موجود بعد از رسیدن به روند گسلی به طرف شرق تغییر جهت داده‌اند و در مناطق مشخصی خط گسل را قطع نموده‌اند. احتمالاً در گذشته نیز به همین صورت بوده است، با این تفاوت که موقعیت آبراهه‌ها در طول زمان تغییر نموده است (حافظی مقدس، ۱۳۸۶).





شکل ۲-۴- نقشه بافت خاک سطحی مشهد (حافظی مقدس، ۱۳۸۶)

## ۲-۶- هیدرولوژی منطقه

دشت مشهد توسط رودخانه سیلابی کشف رود با روند شمال غرب- جنوب شرق و شاخه های فرعی ریزنده به آن به طول حدود ۱۶۰ کیلومتر زهکشی می شود و مازاد جریان آن پس از عبور از دشت های نریمانی و آق دربند و پیوستن به رودخانه هریرود (تجن) به صحرای قره قوم در کشور ترکمنستان می ریزد. رودخانه کشف رود که زهکش سفره آب زیرزمینی دشت مشهد است تا اواخر دهه ۱۳۴۰ جریان داشته و با معمول شدن حفر چاه های عمیق بین سال های ۱۳۳۰ تا ۱۳۴۰ و توسعه بهره برداری

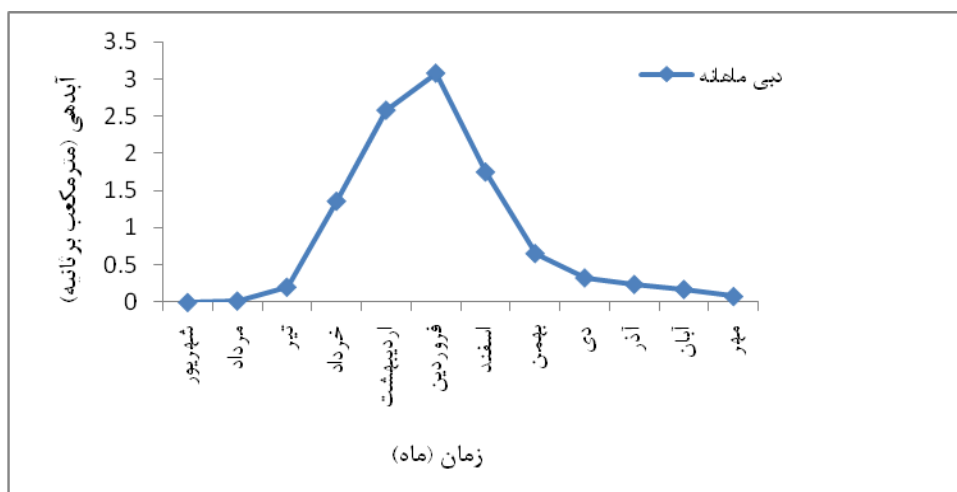
از ذخایر آب زیرزمینی در سال‌های بعد، این رودخانه به صورت خشک‌رودی در مرکز دشت دیده می‌شود. تنها در محل ایستگاه النگ اسدی واقع در ناحیه انتهایی دشت مشهد به واسطه بالا بودن سنگ کف و کم شدن مقطع عرضی دشت اندک آبی مشاهده می‌شود که شاید نتیجه تخلیه فاضلابهای بالادست باشد، بقیه مسیر آن فاقد آب بوده و تنها در فصول سیلابی جریان دارد. سرشاخه‌های مهم ریزنده به این خشک رود از غرب به سمت شرق در دامنه ارتفاعات بینالود چکنه، اخلمد، فریزی، دولت آباد، گل‌مکان، شان‌دیز، طر‌قبه، طر‌ق، بیدک و تنگل شور می‌باشد.

سرشاخه‌های دامنه ارتفاعات هزار مسجد که از شمال غرب به جنوب شرق امتداد دارد شامل بهمن جان، رادکان، ارداک، کارده می‌باشد. سیلاب این رودخانه‌ها مهمترین منبع تغذیه کننده آبخوان آبرفتی دشت مشهد می‌باشد. ایستگاه هیدرومتری النگ اسدی برای بررسی آبهای سطحی انتخاب گردیده است. این ایستگاه در تراز ۸۸۰ متری از آبهای آزاد قرار گرفته است، در سال ۱۳۵۱ تأسیس شده و از سال ۱۳۵۲ دارای آمار آبدهی می‌باشد. دبی رودخانه توسط تجهیزات موجود (اشل، لیمینگراف و تلفریک) به صورت لحظه‌ای در این ایستگاه ثبت می‌شود (جدول ۱-۲).

جدول ۱-۲- مشخصات ایستگاه هیدرومتری النگ اسدی (آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۰)

تجهیزات			مساحت حوضه (km <sup>2</sup> )	ارتفاع متر	مشخصات جغرافیایی			ایستگاه	رودخانه
تلفریک	لیمینگراف	اشل			ارتفاع	عرض	طول		
+	+	+	۹۰۰۵	۱۳۵۱	۸۸۰	۳۶-۱۵-۳۷	۵۹-۴۸-۳۸	النگ	کشفرود

جدول (۲-۲) و شکل (۵-۲) آمار داده‌های دبی پایه و دبی ماهانه را برای دوره شاخص ۴۰ ساله (۴۵-۴۶) تا (۸۴-۸۵) نشان می‌دهد (آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۰).



شکل ۲-۵- هیدروگراف متوسط ماهانه ایستگاه ننگ اسدی

جدول ۲-۲- آمار آبدهی متوسط ماهانه و دبی پایه رودخانه کشف رود در ایستگاه ننگ اسدی

زمان (ماه)	آبدهی متوسط (m <sup>3</sup> /s)	دبی پایه (m <sup>3</sup> /s)
مهر	۰/۰۸	۰/۰۷
آبان	۰/۱۷	۰/۱۵
آذر	۰/۲۴	۰/۲۷
دی	۰/۳۳	۰/۳۷
بهمن	۰/۶۵	۰/۶۷
اسفند	۱/۷۵	۱/۵۹
فروردین	۳/۰۷	۳/۱۲
اردیبهشت	۲/۵۸	۱/۹۹
خرداد	۱/۳۶	۱/۱۵
تیر	۰/۲	۰/۱۶
مرداد	۰/۰۲	۰/۰۱
شهریور	۰	۰
سالانه	۰/۸۷	۹/۶۱

## ۲-۷- هیدروژئولوژی منطقه

هدف از انجام این بخش از مطالعات بررسی وضعیت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی مشهد با توجه به شرایط حاکم بر منطقه می‌باشد. با بررسی آمار منابع آب، میزان برداشت و تغییرات کمی و کیفی ذخایر آب زیرزمینی ارزیابی می‌شود. اولین بررسی آبهای زیرزمینی در دشت مشهد در قالب مطالعات نیمه تفصیلی در سال ۱۳۴۲ شروع و شبکه منابع انتخابی جهت کنترل تغییرات کیفی و کمی آبخوان ایجاد گردید. با توجه به نتایج بررسی‌های انجام گرفته به واسطه افزایش تقاضای حفر چاه و توسعه بهره‌برداری از آبخوان، در دشت مشهد از سال ۱۳۴۸ حفر چاه و توسعه برداشت ممنوع گردید. علی‌رغم اعلام ممنوعیت، به طرق مختلف و عدم مدیریت در حفاظت منابع آب تعداد چاههای حفر شده از ۷۸۰ حلقه با برداشت ۲۷۵ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۴۸ به حدود ۱۰ برابر یعنی ۷۸۹۷ حلقه با برداشت ۹۲۸ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۹ افزایش یافته، آبخوان دشت با متوسط افت سالانه ۰/۷۱ متر در طول ۲۷ سال و دارای کسری مخزنی معادل ۹۴/۴ میلیون مترمکعب مواجه شده است. در حقیقت دشت گرانبی مشهد، بخشی از چاله زمین ساختی اترک-کشف رود می‌باشد که سبب تفکیک دو رشته کوه خراسان شمالی از یکدیگر شده‌اند. بررسی‌های ژئوفیزیک، حفاریهای اکتشافی و پمپاژ نشان می‌دهد که سفره آب زیر زمینی دشت مشهد از نظر کمی و کیفی در نقاط مختلف آن متفاوت است. رسوبات آبرفتی در دامنه ارتفاعات جنوبی از حواشی چنبرغربال تا انتهای دشت، نسبتاً دانه درشت بوده و حداکثر ضخامت آن در حوالی ناظریه بیش از ۲۵۰ متر برآورد می‌شود. در دامنه ارتفاعات شمالی رسوبات آبرفتی ریزدانه و کم ضخامت می‌باشد. در قسمت غربی دشت، حواشی روستاهای فتح آباد، دوغایی، آماجوق تا نزدیکی روستای چنبرغربال ضخامت آبرفت کم بوده و سنگ کف نئوژن گاهی در دشت بیرون‌زدگی دارد، ولی به سمت شرق ضخامت آن افزایش می‌یابد. در شمال شرق شهر مشهد مجدداً از ضخامت آن کاسته می‌شود. به طور کلی نهشته‌های آبرفتی دشت مشهد که حاصل فعالیت رودخانه کشف رود و سر شاخه‌های آن می‌باشد در دو طرف رودخانه به علت رخساره‌های زمین شناسی متفاوت است. عمق سطح آب

زیرزمینی در دشت مشهد متغیر و بین ۴۰ متر در نواحی مرکزی دشت تا ۱۶۰ متر در نواحی جنوبی می‌باشد که به واسطه عمیق بودن سطح آب زیرزمینی نواحی تبخیری وجود ندارد. میزان قابلیت انتقال با توجه به نفوذپذیری و ضخامت لایه اشباع از حدود ۳۰۰۰ متر مربع در روز مربوط به آبرفت‌های واقع در مرکز دشت تا ۹۰۰ متر مربع در روز به سمت جنوب شرق و نواحی خروجی دشت تقلیل می‌یابد. متوسط ضریب ذخیره برای دشت مشهد ۶ درصد برآورد شده است. منابع آب موجود در دشت مشهد شامل چاه، چشمه و قنات می‌باشد که براساس موقعیت در محدوده مطالعاتی (آبخوان آبرفتی مشهد) مورد بررسی قرار گرفته است ((شکل ۲-۶) و (جدول ۲-۳)).

### الف- بررسی چاه‌های منطقه

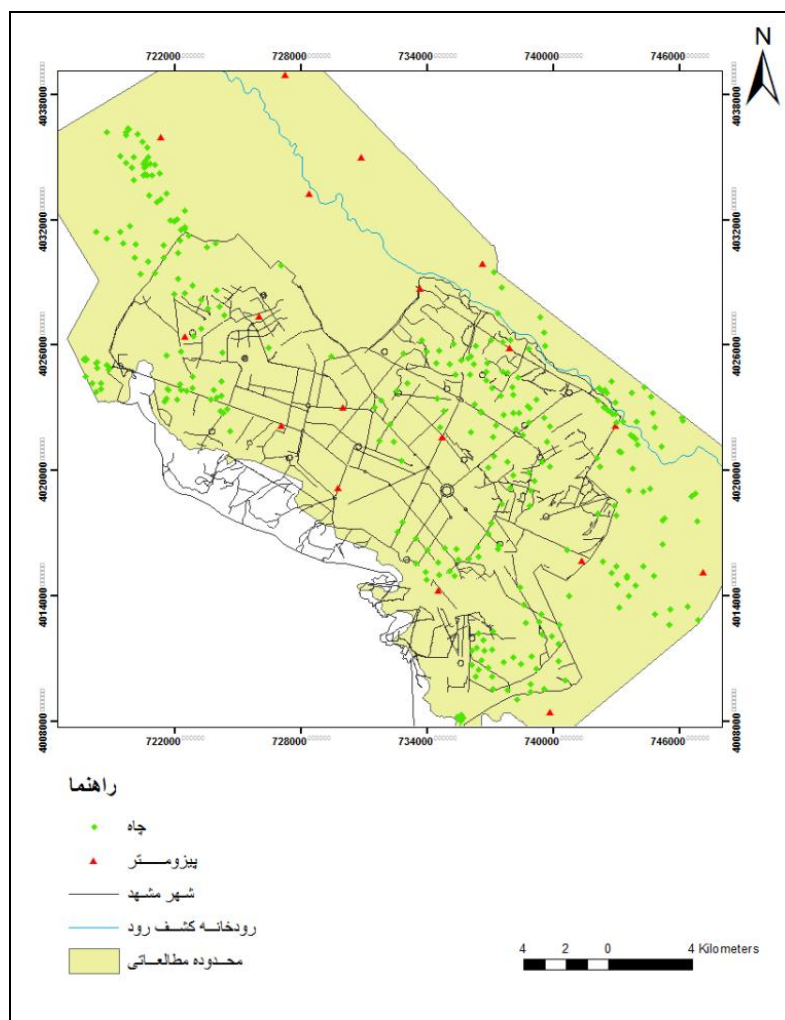
براساس آماربرداری سال ۱۳۸۸ از ۳۰۱۸ حلقه چاه در آبخوان آبرفتی مشهد با تخلیه سالیانه ۴۵۳ میلیون متر مکعب فقط تعداد ۳۱۰ حلقه چاه در محدوده مطالعاتی (مشهد و ۶ کیلومتر اطراف آن) قرار می‌گیرد که در مدل‌سازی نیز از همین تعداد چاه استفاده گردید. بررسی موقعیت چاه‌های موجود نشان می‌دهد، اگر چه توسعه بهره برداری از طریق چاه در تمامی نقاط آبخوان آبرفتی صورت گرفته ولی بیشترین تراکم چاه‌ها در محدوده شهر مشهد مشاهده می‌شود. کثرت چاه‌ها در حواشی شهرک صنعتی و جاده قوچان، همچنین در حوالی شمال شرقی مشهد به حداکثر تراکم خود می‌رسد، به طوری که ۴۵ درصد از میزان تخلیه کلی آبخوان توسط همین چند حلقه چاه انجام می‌شود.

### ب- بررسی قنات‌های منطقه

بررسی آمار بهنگام شده سال ۱۳۸۸ نشان می‌دهد که ۵۶۰ رشته قنات با تخلیه سالیانه ۷۴/۷۶ میلیون متر مکعب در دشت مشهد وجود دارد که در محدوده مطالعاتی فقط ۵ رشته قنات دیده می‌شود. کثرت قنات محدود مورد مطالعه در ارتفاعات جنوبی مشهد می‌باشد. قنات‌های زیادی هم در اثر پایین رفتن سطح آب زیرزمینی خشک شده‌اند. قنات ارتفاعات نیز طول کمی داشته و بیشتر در واریزه‌های موجود در دره‌ها به سن کواترنر حفر شده‌اند. این قنات آبدهی لحظه‌ای اندکی داشته و اکثراً هوابین می‌باشند.

## ج- بررسی چشمه‌های منطقه

بر اساس نتایج به دست آمده از آمار بهنگام شده سال ۱۳۸۸، تعداد ۵۲۶ دهانه چشمه با مجموع تخلیه سالیانه ۷۸/۸۳ میلیون مترمکعب در سطح دشت مشهد وجود دارد. چشمه‌های محدوده مورد مطالعه در ارتفاعات محدوده مطالعاتی مشاهده می‌شوند. چشمه‌های محدوده مشهد نیز در اثر کاهش بارندگی‌های اخیر کاهش آبدی داشته‌اند. بررسی موقعیت چشمه‌ها نشان می‌دهد تمامی چشمه‌های موجود در ارتفاعات قرار داشته و هیچ چشمه‌ای (زهکشی) در سطح آبخوان آبرفتی وجود ندارد (سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۰).



شکل ۲-۶- موقعیت منابع آبی در آبخوان آبرفتی شهر مشهد و حومه

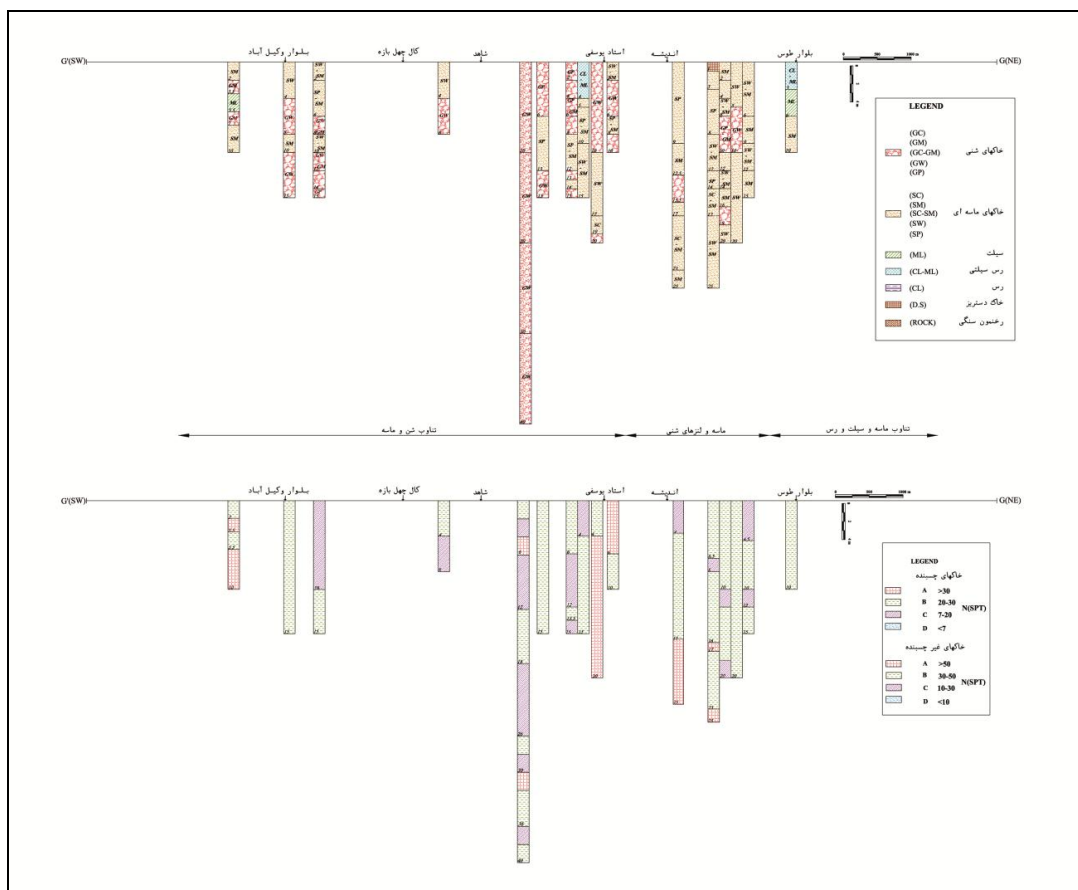
جدول ۲-۳- منابع آبی دشت مشهد (آب منطقه ای خراسان رضوی، ۱۳۹۰)

منابع					محدوده مطالعاتی	
قنات	چشمه	چاه (حلقه)			کد	نام
		اکتشافی	مشاهده ای	بهره برداری		
۱۰۸۳	۶۸۰	۲۳	۷۲	۷۸۹۷	دشت	مشهد
۵	۰	-	۱۷	۳۱۰	شهر مشهد و حومه	

### د- تعیین نوع آبخوان

آبخوان تحت فشار در شرایط فعلی در سطح محدوده مشهد گزارش نشده است. با بررسی لاگ چاهها و پیزومترهای منطقه مورد مطالعه می توان وضعیت آبخوان را از نظر آزاد و یا محصور بودن تشخیص داد

(شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷- لاگ برخی از چاهها و پیزومترهای آبخوان شهر مشهد (حافظی مقدس، ۱۳۸۶)

بررسی لاگ چاه‌ها و پیزومترهای موجود نشان می‌دهد که آبخوان منطقه مورد مطالعه در بیشتر موارد به صورت آزاد می‌باشد و فقط بخش‌های کوچکی به دلیل وجود رسوبات دانه‌ریز، آبخوان حالت نیمه‌محصور دارد که در آن ناهمگنی‌های لیتولوژیکی وجود دارد. البته در گذشته وجود رس در بین نهشته‌های آبرفتی ذکر شده سفره‌های تحت فشار و نیمه تحت فشاری در قسمت میانی دشت ایجاد نموده بود که به تدریج به واسطه افت سطح آب زیرزمینی در اثر بهره‌برداری زیاد از منابع آب و کاهش فشار پیزومتری، چاه‌ها از حالت آرتزین خارج شده و سفره‌های تحت فشار از بین رفته است. در شرایط موجود آبخوان دشت تقریباً یک سفره آزاد می‌باشد.

## ۲-۷-۱- بررسی وضعیت کمی سیستم آب زیرزمینی

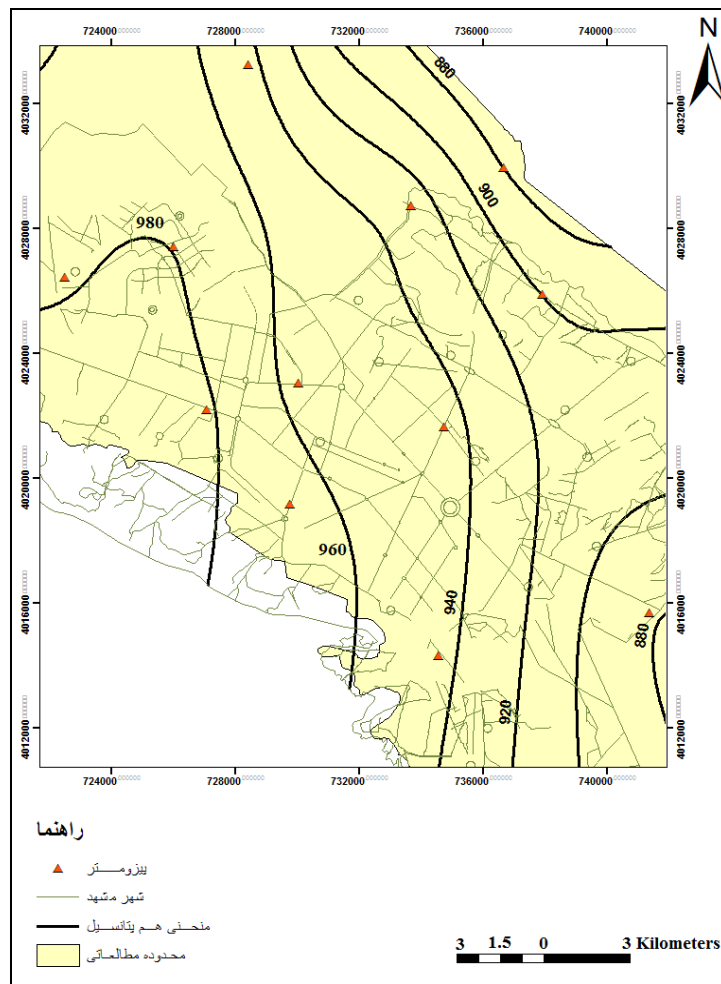
در این قسمت به بیان ویژگی‌های سیستم با تأکید بر پارامترهای کمی از قبیل تعیین جهت جریان، منحنی‌های هم‌افت، هیدروگراف واحد و ... پرداخته می‌شود.

### ۲-۷-۱-۱- نقشه تراز سطح آب زیرزمینی

نقشه تراز آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی در سال آبی ۱۳۸۷ با بهره‌گیری از عمق سطح ایستابی و تراز سطح زمین، با هدف بررسی پتانسیل سطح ایستابی، تشخیص جهت عمومی جریان آب زیرزمینی، مناطق تغذیه و تخلیه آب زیرزمینی و محاسبه شیب هیدرولیکی، ترسیم گردید. برای ترسیم نقشه خطوط هم‌تراز از داده‌های شهریور ماه سال ۸۷ استفاده شده است. جهت جریان آب زیرزمینی در شهر مشهد، تابع جهت حرکت آب در آبخوان می‌باشد. خطوط تراز سطح آب در ابتدای آبخوان دشت مشهد با منحنی ۱۳۰۰ متر شروع شده که به سمت شرق در انتهای سفره کاهش یافته به ۸۶۰ متر از سطح دریا می‌رسد. اختلاف پتانسیل ۴۴۰ متر بین ابتدا و انتهای دشت شیب هیدرولیکی کلی آبخوان را در امتداد رودخانه کشف رود (۲/۷ در هزار) نشان می‌دهد. فشردگی خطوط تراز سطح آب گویای



افزایش شیب هیدرولیکی به سمت شرق و شمال شرق و بیانگر مرز خروجی آبخوان آبرفتی شهر مشهد است. از حاشیه ارتفاعات جنوبی (بینالود) جهت جریان به سوی مرکز دشت (رودخانه کشف رود)، از جنوب غرب به سمت شرق و شمال شرق می باشد (شکل ۲-۸).



شکل ۲-۸- نقشه هم پتانسیل منطقه براساس داده‌های شهریور ۸۷

## ۲-۱-۷-۲- هیدروگراف واحد دشت مشهد

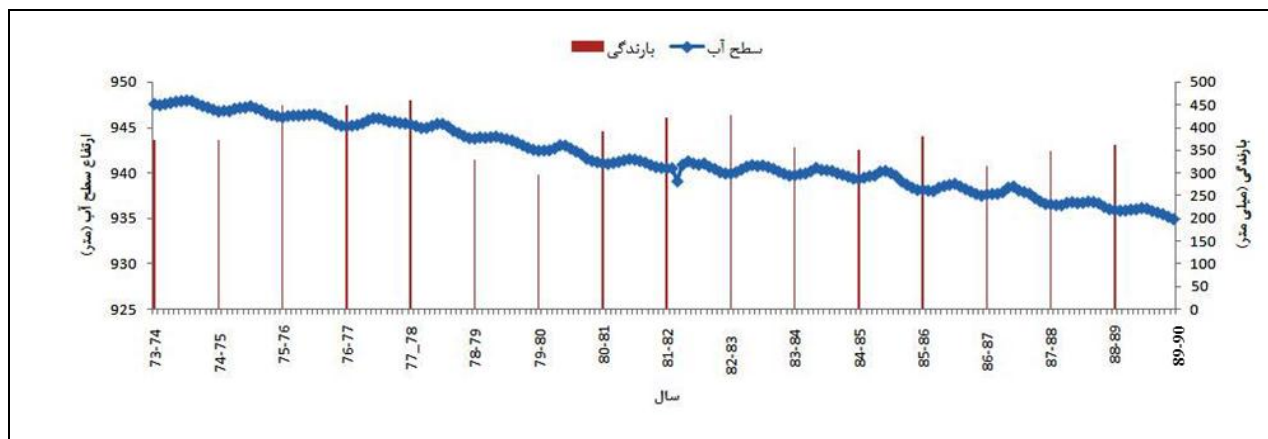
هیدروگراف واحد معرف تغییرات میانگین آبخوان در زمان است که در آن مساحت تحت نفوذ هر چاه مشاهداتی، لحاظ شده است. از این نمودار جهت بررسی متوسط نوسانات سطح آبخوان دشت، تعیین دوره‌های مرطوب و خشک و بررسی تغییرات دوره‌ای استفاده می‌شود. در یک منطقه در صورت وجود

چند چاه پیزومتری و اندازه‌گیری سطح آب این پیزومترها در یک زمان مشخص می‌توان هیدروگراف واحد منطقه که معرف تغییرات در کل دشت است را جهت تفسیر وضعیت کمی آبخوان تهیه نمود. یکی از روش‌های معمول برای تهیه هیدروگراف روش تیسن می‌باشد، جهت ترسیم هیدروگراف واحد پس از بررسی داده‌های چاه‌های مشاهداتی منطقه، یک دوره از مهر سال ۱۳۷۳ تا شهریور سال ۱۳۸۹ انتخاب شد. با توجه به این که ترسیم این نمودار نیاز به شبکه تیسن دارد، ابتدا موقعیت چاه‌های مشاهداتی که دارای طول داده مناسبی می‌باشند وارد نرم‌افزار Arcview شد.

سپس با استفاده از این نرم‌افزار پلیگون‌های تیسن برای هر یک از این چاه‌های مشاهداتی ترسیم و مساحت مربوط به هر پلیگون محاسبه گردید. پس از محاسبه مساحت هر پلیگون و محاسبه مساحت کل حوضه، میانگین وزنی نوسانات ماهیانه آبخوان برای تمامی ماه‌ها محاسبه و نمودار هیدروگراف واحد آبخوان ترسیم شد. اگرچه هیدروگراف دشت اطلاعات مفیدی را ارائه می‌دهد ولی برای ارزیابی بهتر آن می‌توان هیدروگراف را با بارندگی مورد مقایسه قرار داد.

بر پایه نمودار فوق نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی دشت متأثر از نزولات جوی و نحوه بهره‌برداری از آبخوان است. در آبخوان مشهد از سال آبی ۷۴\_۷۳ لغایت ابتدای سال آبی ۷۸\_۷۷ افت سطح آب زیرزمینی ناچیز بوده و در برخی سالها افزایش سطح آب (۰/۱۱ متر در سال) نیز رخ داده است. از سال آبی ۷۸\_۷۷ تا کنون افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی مشهد تشدید شده است (سالانه ۱/۰۳ متر). مجموع افت ۱۵ ساله (از سال آبی ۷۴\_۷۳ لغایت ۸۹\_۸۸) در آبخوان آبرفتی دشت مشهد ۱۲/۵۶ متر و متوسط افت سالیانه در این دوره برابر ۰/۸۳ متر است.

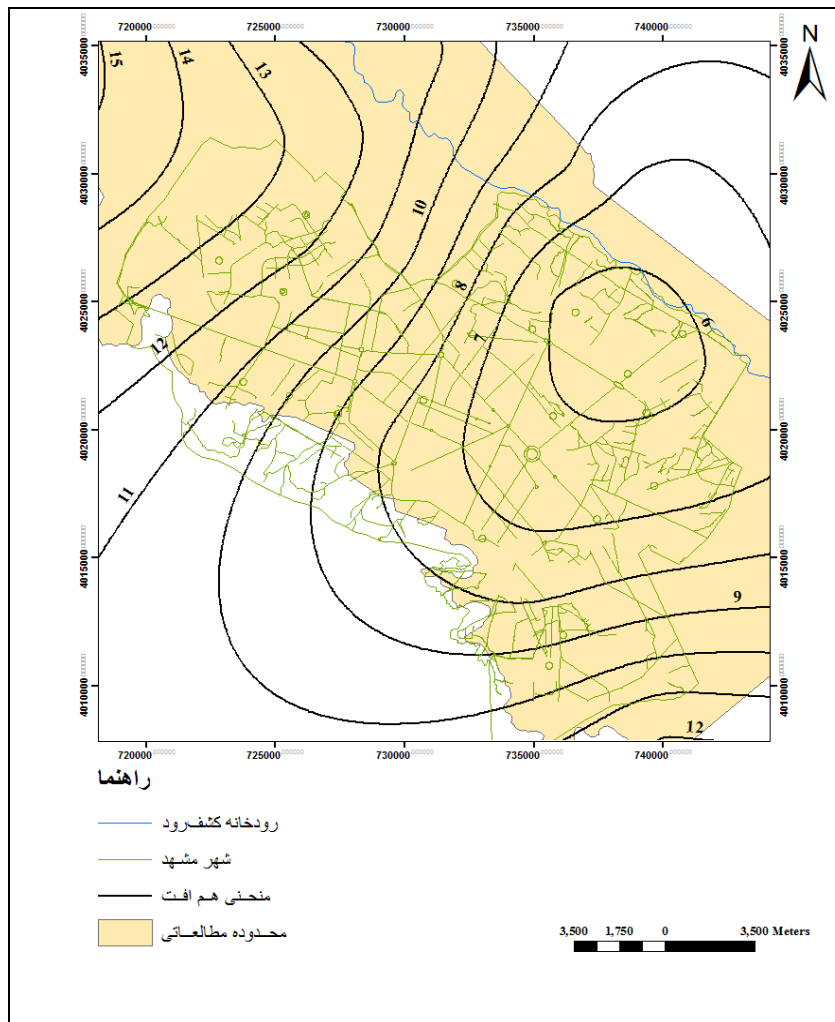
به‌طور کلی هیدروگراف دشت به علت افزایش تخلیه از چاه‌ها و کاهش بارندگی، دارای روند نزولی می‌باشد (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۹- هیدروگراف واحد دشت مشهد

### ۲-۷-۱-۳- نقشه افت سطح آب زیرزمینی

یکی از رایج‌ترین پیامدهای توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی افت سطح آب زیرزمینی می‌باشد. با استفاده از نتایج اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در پانزده سال اخیر (از سال آبی ۷۳-۷۴ لغایت ۸۸-۸۹) نقشه اختلاف سطح آب زیرزمینی برای آبخوان آبرفتی مشهد ترسیم و ارائه شده است (شکل ۲-۱۰). بررسی نقشه نشان می‌دهد که میزان اختلاف سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی مشهد متناسب با میزان بهره‌برداری توسط چاهها و تغذیه آبخوان در نقاط مختلف بسیار متغیر است. در دامنه ارتفاعات جنوبی شهر مشهد میزان افت سالیانه در دوره شاخص آماری، به دلیل درشت دانه بودن بافت خاک (هدایت هیدرولیکی زیاد) و افزایش چاه‌های پمپاژ در حاشیه کشف رود (ایجاد شیب هیدرولیکی مثبت)، ۸۰ سانتی‌متر می‌باشد. با توجه به تخلیه بالا در جهت جریان آب زیرزمینی سمت شرق و شمال‌شرق شهر مشهد، افت سطح آب زیرزمینی به طرف کشف رود به کمتر از ۴۰ سانتی‌متر در سال کاهش می‌یابد. این افزایش حجم آب برگشتی به آبخوان به واسطه توسعه مناطق شهری از جمله دلایل افزایش سطح آب زیرزمینی است. به طور کلی منحنی‌های هم‌افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی مشهد از روند یکنواختی تبعیت ننموده و منحنی‌های بسته‌ای متناسب با تمرکز بهره‌برداری در بخشهای مختلف آبخوان مشهد تشکیل شده است. علاوه بر این مورفولوژی ناهموار سنگ کف باعث شده در فاصله‌ای کوتاه، از میزان اختلاف سطح آب، به شدت کاسته شود.

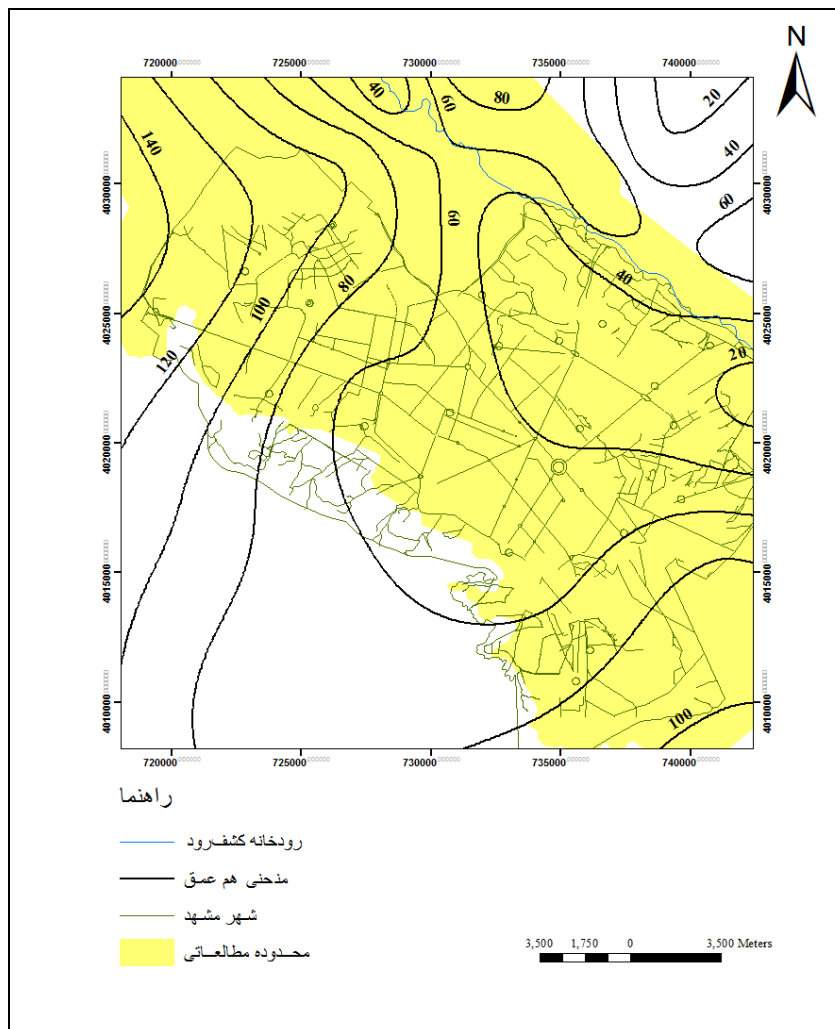


شکل ۲-۱۰- نقشه هم افست منطقه در طی دوره اسفند ۷۳ لغایت اسفند ۸۸

## ۲-۷-۱-۴- نقشه هم عمق سطح آب زیرزمینی

تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی مشهد متأثر از شیب هیدرولیکی سطح آب و مورفولوژی سطح زمین می‌باشد. در محدوده مطالعاتی مشهد با توجه به وضعیت توپوگرافی و شرایط آبخوان، روند منحنی‌های هم عمق سطح آب زیرزمینی در نواحی مختلف آن متفاوت است. عمق برخورد به آب زیرزمینی در دشت مشهد، حاشیه کشف رود در جهت جریان به واسطه ناهمواری سنگ کف و نقاط برداشت از ۷۰ متر تا کمتر از ۵ متر متفاوت است. در شهر مشهد، جنوب شرق دشت و حاشیه ارتفاعات شمالی و جنوبی عمق سطح آب زیاد بوده که به طرف مرکز دشت (کشف رود) کاهش می‌یابد. عمق برخورد به آب در جنوب شهر مشهد از ۱۲۰ متر (شمال وکیل آباد) تا ۶۰ متر متغیر است

که در جهت شمال شرق به سوی کشف رود به ۲۰ متر می‌رسد. وجود چاه‌های جاذب و افزایش نفوذ آب در محدوده شهر مشهد همچنین افتادگی توپوگرافی باعث پیشروی منحنی هم عمق ۴۰ و ۶۰ متر به سمت ارتفاعات بینالود گردیده است (شکل ۲-۱۱).



شکل ۲-۱۱- نقشه هم‌عمق منطقه بر اساس داده‌های مهر ۸۸

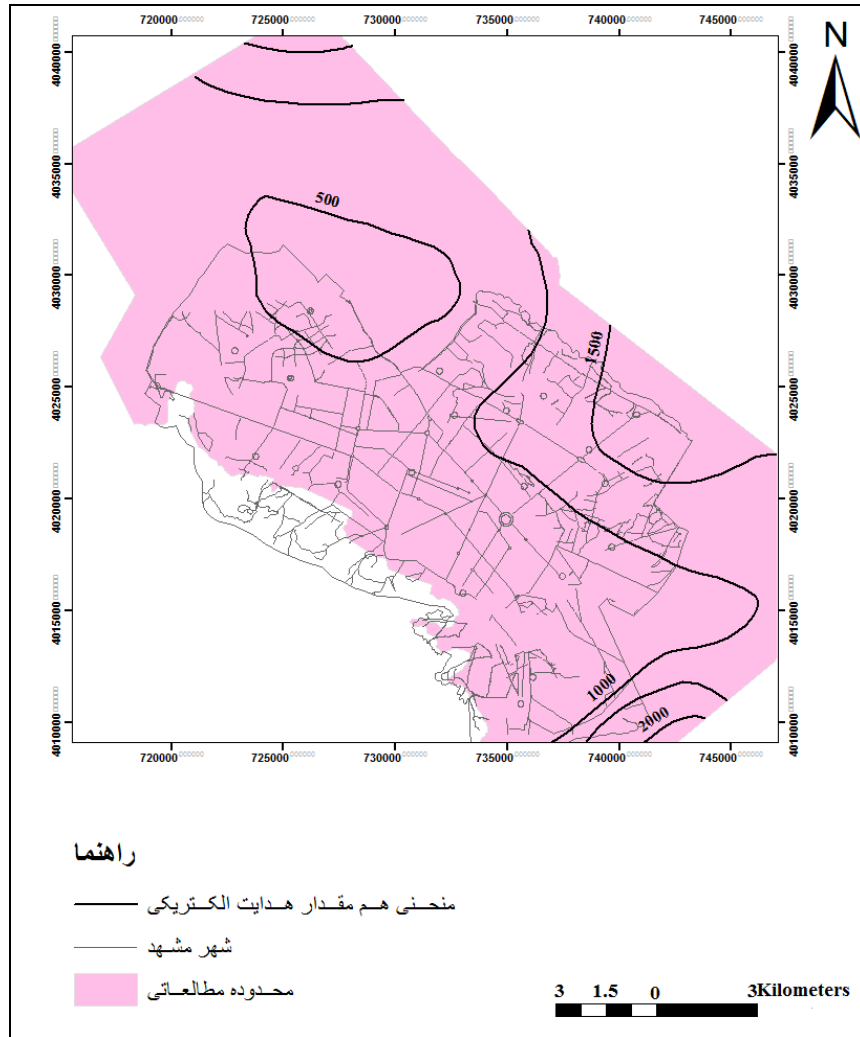
## ۲-۷-۲- بررسی وضعیت کیفی سیستم آب زیرزمینی

بررسی کیفیت منابع آب علاوه بر اهمیت ویژه‌ای که برای تعیین نوع کیفیت آب جهت مصارف گوناگون دارد، در جهت شناخت برخی از مسائل هیدروژئولوژیکی نیز به ما کمک می‌کند. کیفیت

شیمیایی منابع آب سطحی و زیرزمینی بسته به نوع و جنس سازندهای پیرامون دشت (منابع تغذیه کننده) و آبرفت متفاوت است. غلظت املاح در آب باران بسیار اندک می‌باشد ولی در هنگام نفوذ و عبور از لایه‌های مختلف افزایش می‌یابد. جنس واحدهای مختلف زمین‌شناسی و مدت زمان ماندگاری، دو پارامتر اصلی کنترل کننده غلظت املاح در منابع آب سطحی و زیرزمینی است. به همین جهت کیفیت آب زیرزمینی معمولاً در مخروط افکنه‌های حاشیه ارتفاعات که محل تغذیه آبخوان است بهتر می‌باشد و در جهت حرکت جریان آب زیرزمینی از کیفیت آن کاسته می‌شود. با توجه به اینکه بررسی کیفی معمولاً بر مبنای آخرین آمار و اطلاعات کیفی منابع آب صورت می‌گیرد، لذا برای بررسی وضعیت هیدروژئوشیمی منابع آب محدوده مشهد و تهیه نقشه تغییرات هدایت الکتریکی و یون کلر، در بخش آب زیرزمینی از نتایج آنالیز نمونه برداری شهریور سال ۱۳۸۵ استفاده شده است.

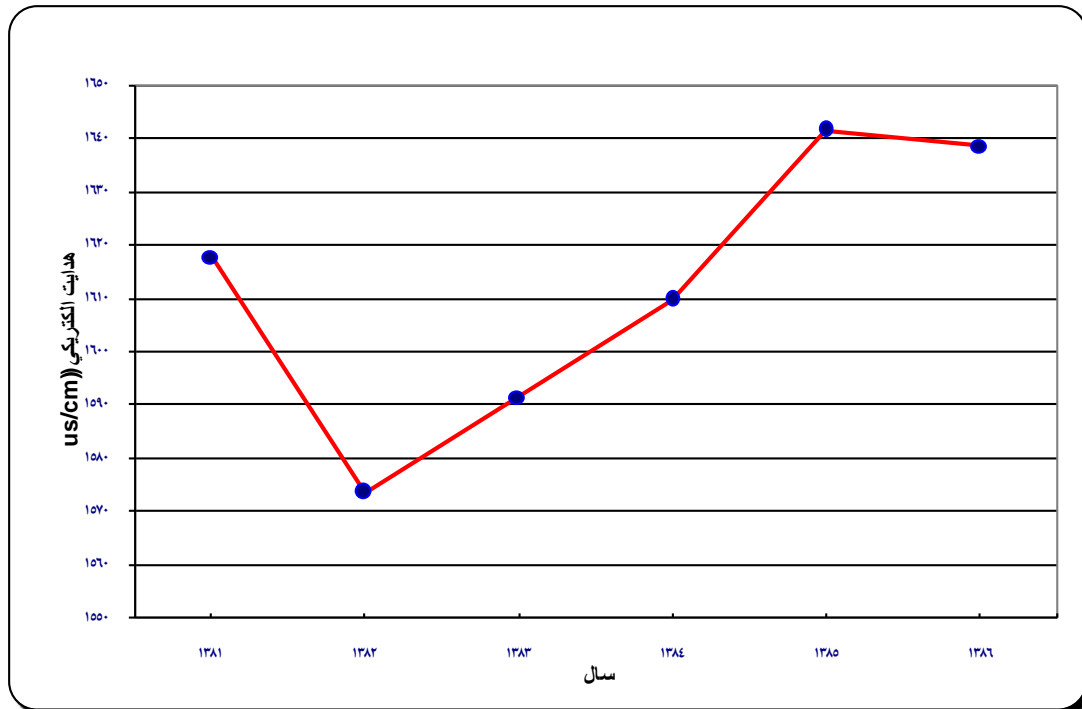
#### ۲-۷-۲-۱- هدایت الکتریکی (EC)

میزان هدایت الکتریکی با درجه یونیزاسیون آنیون‌ها و کاتیون‌ها و میزان آنها نسبت مستقیم دارد. بدیهی است که با افزایش قابلیت هدایت الکتریکی کیفیت آب تنزل می‌یابد. منحنی‌های هدایت الکتریکی در دشت مشهد با توجه به محل‌های تغذیه آبخوان، کیفیت آب جریانهای سطحی ورودی به دشت و سازندهای زمین‌شناسی حاشیه دشت روند تغییرات کیفی آبخوان آبرفتی را مشخص می‌نماید. هدایت الکتریکی آبخوان در حاشیه ارتفاعات بینالود حداقل بوده، به سمت مرکز دشت (حاشیه کشف‌رود) و جنوب شرقی دشت (محل خروجی کشف‌رود) به سبب تأثیرات سنگ کف نئوژن (واجد لیتولوژی مارن و گچ) و نیز دانه ریز بودن و شدن رسوبات، افزایش می‌یابد. کندانکتیویته آب زیرزمینی در سطح شهر مشهد از ۵۳۰ تا ۲۱۳۰ میکروزیمنس تغییر می‌کند، این افزایش می‌تواند متأثر از نفوذ چاههای دفع فاضلاب شهری دارای نیتريت و نیترات بیش از حد باشد به طوری که باید آنها را از مدار شرب خارج نمود (شکل ۲-۱۲).



شکل ۲-۱۲- نقشه هم مقدار هدایت الکتریکی (بر حسب میکروزیمنس بر سانتی متر) بر اساس آنالیزهای ۱۳۸۵

با استفاده از نمونه برداری‌های دوره‌ای صورت گرفته در آبخوان مشهد نمودار کموگراف کیفی (هدایت الکتریکی) برای دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۶ تهیه شده است (شکل ۲-۱۳). بررسی این نمودار نشان می‌دهد هر چند در سال‌های ۸۱-۸۲ مقدار هدایت الکتریکی کاهش یافته ولی به طور کلی هدایت الکتریکی دشت مشهد به مرور زمان در حال افزایش است (سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۰).

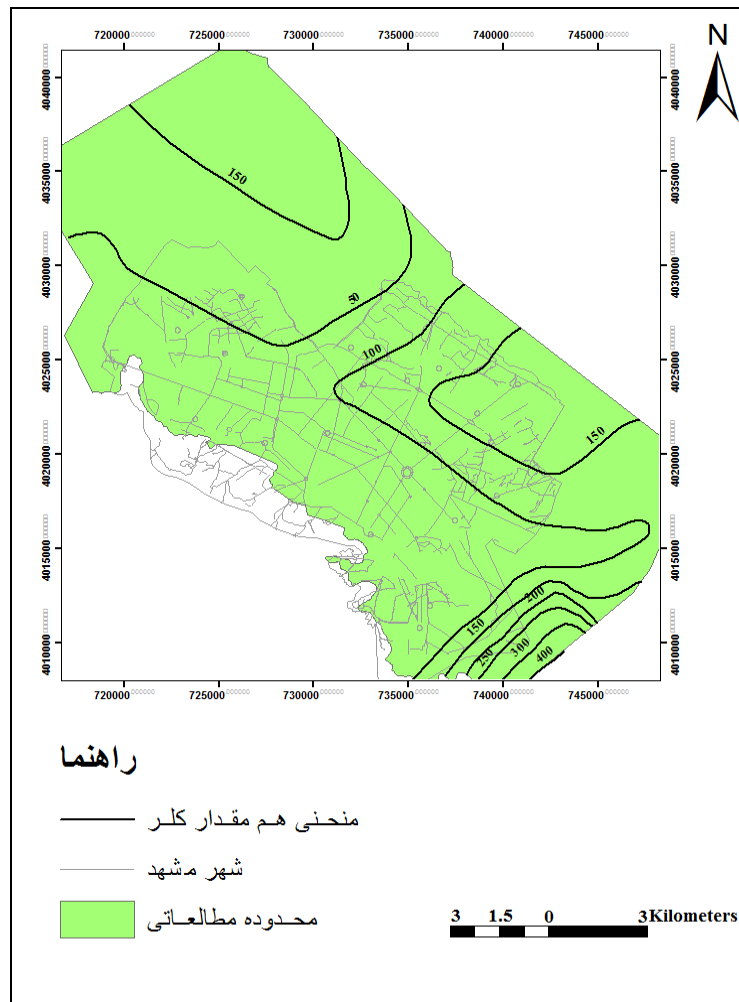


شکل ۲-۱۳- کموگراف معرف کیفی آبخوان دشت مشهد

## ۲-۲-۷-۲- تغییرات کلر

آب زیرزمینی در جهت حرکت و با گذشت زمان تمایل دارد تا از ترکیبی با  $\text{HCO}_3^-$  غالب به ترکیبی با میزان بالای  $\text{Cl}^-$  تکامل یابد که در نهایت به ترکیب شیمیایی آب دریا نزدیک می‌شود. نقشه خطوط هم کلر شهر مشهد با استفاده از نتایج آنالیز شیمیایی برای سال ۱۳۸۵ تهیه شده است (شکل ۲-۱۴). در شرایط معمولی میزان یون کلر هماهنگ با مقادیر هدایت الکتریکی در مسیر حرکت آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. مقدار یون کلر در سطح شهر مشهد کمی افزایش یافته است اما مقدار آن در شمال شهر، در حاشیه کشف رود به بیشتر از ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد. این افزایش می‌تواند ناشی از چاههای دفع فاضلاب خانگی و صنعتی باشد که با تکمیل شبکه جمع آوری فاضلاب احتمالاً کاهش خواهد یافت. به سمت شرق و جنوب شرق شهر مشهد (انتهای دشت) در محل خروجی کشف‌رود، خطوط هم ارزش ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر عبور می‌کند.



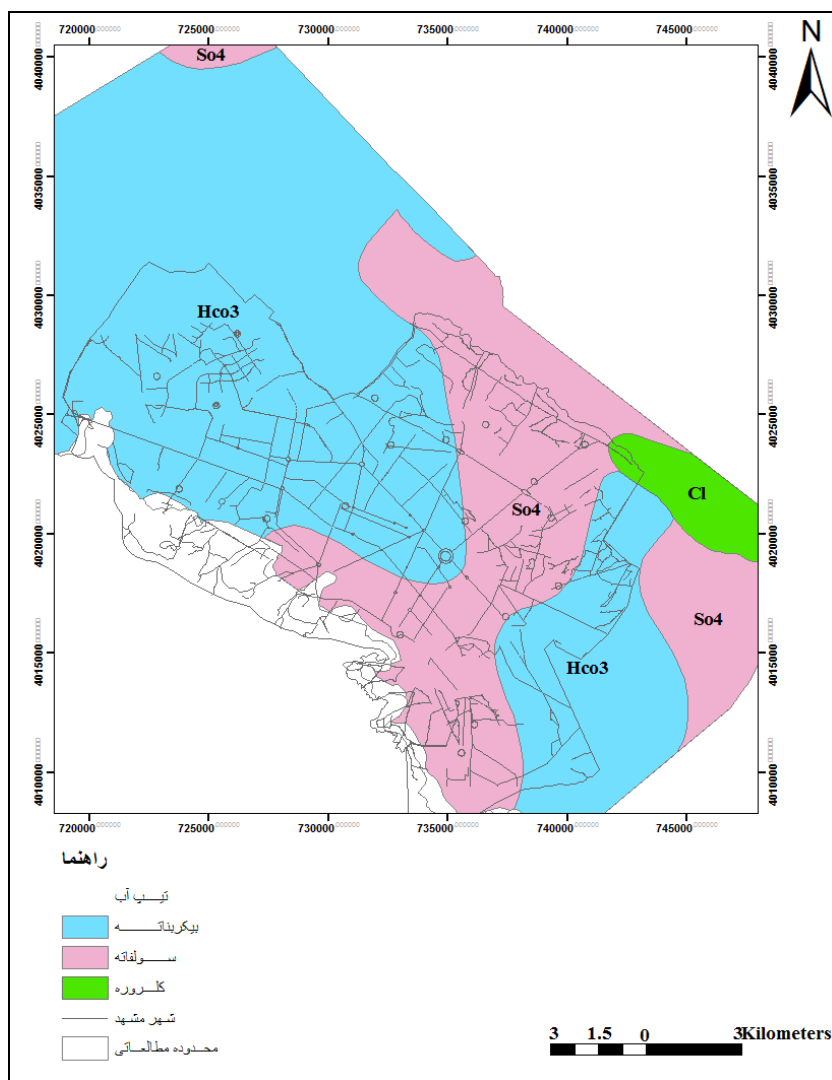


شکل ۲-۱۴- نقشه هم مقدار کلر بر اساس آنالیزهای ۱۳۸۵

### ۲-۷-۲- تیپ آب محدوده مطالعاتی

برای تعیین تیپ آب‌های زیرزمینی از کاتیون‌ها و آنیون‌های عمده استفاده می‌شود. به این صورت که ابتدا آنیون‌ها و کاتیون‌ها را براساس مقدار و به صورت جداگانه مرتب می‌کنند. آنیون‌ها و کاتیون‌هایی که دارای بیشترین مقدار هستند، تعیین‌کننده تیپ و رخساره آب زیرزمینی می‌باشند، به طوری که ابتدا نام آنیون غالب و سپس نام کاتیون غالب می‌آید. رخساره‌های هیدروشیمیایی جهت توصیف تفاوت‌ها در ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رخساره‌های هیدروشیمیایی می‌توانند به عنوان ابزاری ساده و سریع جهت تفسیر تفاوت در آب‌های یک یا چند موقعیت مورد استفاده قرار گیرند (Fetter, 1999).

آب‌ها در شهر مشهد بیشتر از نوع سولفات‌ها و بیکربناته هستند. تیپ غالب آب بیشتر از نوع سولفات-سدیک، بیکربنات-سدیک، بیکربنات-کلسیک، سولفات-کلسیک می‌باشد (شکل ۲-۱۵).  
 به طور کلی شهرسازی باعث تغییر کیفیت آب شده است و چند تیپ متفاوت را در آب به وجود آورده است (سازمان آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، ۱۳۸۹). ورود فاضلاب شهری سبب افزایش در میزان سولفات، کلراید و نیترات در سفره آب زیرزمینی گردیده است. در آینده با تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب در سطح شهر مشهد شاهد بهبود نسبی آب زیرزمینی از لحاظ کیفی خواهیم بود.



شکل ۲-۱۵- تیپ آب زیرزمینی بر اساس آنالیزهای ۱۳۸۵

**۲-۷-۲-۴- ارزیابی آب برای مصارف مختلف در دشت مشهد**

کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی برای شرب بر اساس دیاگرام شولر در حاشیه شمالی آبخوان از قابل قبول تا مناسب بهره‌برداری و در شمال غرب قابل قبول و در حاشیه ارتفاعات بینالود بدترین کیفیت آب در مؤمن آباد است. در داخل شهر در منطقه نخریسی نامناسب و در نقاط دیگر از قبیل سرآسیاب، احمدآباد و هاشم‌آباد کیفیت خوب است. کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی برای کشاورزی بر اساس دیاگرام ویلکوکس در جنوب شرق (قازقان- تنگل شور- جیم آباد) و در شمال غرب (مؤمن آباد) در محدوده C3S4 دیاگرام قرار داشته و خطر شوری و تخریب ساختمان خاک در صورت استفاده زیاد وجود دارد. در نقاط دیگر عمدتاً در محدوده C2S1 , C3S1 دیاگرام دارای خطر اندک سدیم و شوری متوسط تا زیاد می‌باشد. آب سازندی در محدوده C2S1 دیاگرام به لحاظ شوری دارای خطر متوسط و به لحاظ سدیم دارای خطر اندک است (سازمان آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، ۱۳۹۰).

## فصل سوم: معرفی پدیده فرونشست

### ۳-۱- مقدمه

نشست زمین (Land Subsidence)، پایین رفتن سطح زمین در اثر تغییر شکل و جابجایی‌های صورت گرفته در لایه‌های زیرین خاک است. مهم‌ترین عوامل مؤثر در پدیده نشست عبارتند از: پمپاژ آب، نفت و گاز از مخازن زیرزمینی (German and Soki, 1984)، زهکشی آب از خاکهای آلی، تحکیم لایه‌های خاک تحت تأثیر وزن لایه‌های فوقانی، انجام خاکریزی و احداث ساختمان‌های سنگین، عوامل دینامیکی و تکتونیکی، استخراج معادن زیرزمینی و انحلال لایه‌های آهکی که در مواردی موجب ایجاد فروچاله‌های ریزشی (Collapse Sinkholes) می‌گردد (کیومرثی، ۱۳۸۱).

در اغلب موارد، برداشت و استخراج بیش از حد آب از سفره‌های آب زیرزمینی، که امروزه به دلیل رشد روزافزون جمعیت با نرخ بیشتری نسبت به گذشته صورت می‌گیرد، علت اصلی نشست بوده است. یکی از مشکلات مهم در ارتباط با برداشت بی‌رویه آب از آبخوان افت سطح آب و متراکم شدن لایه‌ها و رسوبات است. این پدیده باعث نشست سطح زمین به صورت ناگهانی (در اثر تراکم سفره‌های ماسه‌ای) و یا به طور تدریجی (در اثر تراکم سفره‌های رسی) می‌گردد. این امر به صورت بالقوه می‌تواند باعث مشکلاتی مانند ایجاد درز و شکاف در سطح زمین، تخریب ابنیه و لوله‌زایی (بالا آمدن لوله‌های آب از سطح زمین)، تغییر شیب رودخانه‌ها و جاده‌ها، فرورفتن تدریجی دکل‌ها و سازه‌ها، ریزش جدار چاه‌ها، تغییر شیب زمین و افزایش سیل‌خیزی منطقه گردد (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۴). در این تحقیق پدیده فرونشست زمین در اثر افت آبخوان شهر مشهد پس از انجام طرح جمع‌آوری فاضلاب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۳- مروری بر مطالعات بررسی فرونشست‌ها

### ۳-۲-۱- مطالعات جهانی

بر اساس اطلاعات کار گروه فرونشست در سازمان یونسکو<sup>۱</sup> (IHP) قدیمی‌ترین فرونشست شناخته شده در ایالت آلابامای ایالات متحده در سال ۱۹۰۰ میلادی به وقوع پیوسته است. اساس مطالعات این کار گروه بررسی‌های تفضیلی بر روی ۴۲ فرونشست در ۱۵ کشور جهان بوده است. از حدود سال ۱۹۶۵، یونسکو اولین برنامه جهانی خود را برای چرخه‌های آب‌شناختی تحت عنوان دهه جهانی آب‌شناسی آغاز نمود که در سالهای بعد مطالعه فرونشست‌ها به یکی از موضوعهای اصلی آن تبدیل گشت. در آوریل ۱۹۷۵ گروه کاری فرونشست در پاریس شکل گرفت که اساس کار آن بررسی ارتباط این پدیده با آبهای زیرزمینی بود. از آن تاریخ تا به امروز بررسی‌های بیشتری در این زمینه در کشورهای پیشرفته به ویژه در ایالات متحده و ژاپن انجام شده است که نتیجه آن کنترل شدید مصرف آب و تغییر در الگوی مصرف و توقف فرونشست‌ها در بسیاری از موارد بوده است. در این بررسی‌ها از روشها و تکنیکهای جدید مانند سیستمهای مکان‌یابی جغرافیایی پیشرفته (GPS)، رادار (SAR & InSAR) برای مکان‌یابی فرونشست‌ها به صورت گسترده‌ای استفاده شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، ۱۳۸۳).

شهر ونیز در کشور ایتالیا بر روی دلتای رودخانه پو (PO) و از رسوباتی ماسه‌ای، سیلتی و رسی ساخته شده است. در این شهر افسانه‌ای کلیساها و قصرها در سال‌های قبل با نرخ حدود ۰/۵ سانتی‌متر در سال در زمین فرورفته است. در سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۷۳ این شهر حدود ۱۵ سانتی‌متر فرونشست داشته است (Gambolati et al., 1974).

ایالت کالیفرنیا مناطق تحت فرونشست بیشتری در مقایسه با سایر نقاط آمریکا دارد. قسمت جنوبی دره کالیفرنیا به شدت توسط آب‌های زیرزمینی آبیاری می‌گردد. در این مناطق حداقل ۱۱۰۰۰

<sup>1</sup> United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization

کیلومتر مربع از زمین‌های کشاورزی از سال ۱۹۲۰ تاکنون بیش از ۰/۳ متر نشست کرده‌اند، که بزرگترین محدوده فرونشست زمین در جهان را تشکیل می‌دهند. این منطقه ناحیه‌ای به طول ۱۱۳ کیلومتر با بیش از ۳ متر نشست و حداکثر نشست ۸/۵ متر داشته است (Poland, 1981).

در نواحی هوستون تگزاس آمریکا، نتایج فرونشست حاصل از افت سطح آب زیرزمینی قابل ملاحظه است. ناحیه هوستون برطبق این که آیا سطح آب در چاههای آرتزین در حال افزایش (شرق ناحیه) یا کاهش (غرب ناحیه) به ۲ ناحیه تقسیم شده است. نرخ فرونشست منطقه غرب، افزایش یافته و ملایم غیرخطی حدود ۷۲ میلی‌متر در سال تا سال ۱۹۸۷ بوده است. فقط در ۷ مایلی غرب شهر هوستون (منطقه شرقی) نرخ فرونشست بالای ۷۰ میلی‌متر در سال، در بازه زمانی ۱۹۷۳ تا ۱۹۷۸ شناسایی شده است، در این منطقه کاهش تنظیم شده پمپاژ آب زیرزمینی و همچنین ورود آبهای سطحی از دریاچه هوستون مسئول کاهش فرونشست در سالهای آتی است اما در نواحی غرب هوستون که رشد سریع مسکونی و تجاری را تجربه کرده است، پمپاژ به میزان قابل توجهی افزایش یافته است و به تناسب آن فرونشست ادامه دارد. نشست در منطقه هوستون خطرناک بوده زیرا این منطقه ساحلی در معرض جذر و مدهای بسیار شدید قرار دارد (Holdahl and Zilkoski, 1991).

افت زیاد آب آبخوان‌های محبوس جنوب غرب فلاندر، مخروط فرونشست را توسعه داده است. این مخروط فرونشست با مقایسه ترازهای مرتبه اول موسسه جغرافیایی ملی (بلژیک)، بین تراز سال‌های ۱۹۴۶ تا ۱۹۴۸ و ۱۹۷۶ تا ۱۹۸۰ نقشه برداری شد. در مرکز مخروط نشست، مقادیر افت آبخوان‌های نیمه محبوس به حداکثر خود رسیده‌اند. تغییر شکل افت سطح آب با استفاده از یک محور متقارن هیبریدی تفاضل محدود و مدل عددی اجزا محدود، می‌تواند در اطراف چاه پمپاژ محاسبه شود. در این مدل محور متقارن مخزن آب زیرزمینی در تعداد زیادی از لایه‌های گسسته، می‌تواند همگن جانبی فرض شود. بنابراین تغییر شکل افت می‌تواند در سطوح مختلف از ضخامت لایه‌های نیمه نفوذپذیر شبیه‌سازی گردد. به این ترتیب، می‌توان سیر تکاملی فرونشست را که عمدتاً به دلیل تراکم لایه‌های نیمه نفوذپذیر است، شبیه‌سازی کرد. در اینجا، تکامل نشست با نرخ تخلیه ثابت در هر دو

مورد زیر محاسبه می‌شود: برای پمپاژ در قسمت پایین آبخوان نیمه محبوس و پمپاژ در قسمت بالای آبخوان نیمه محبوس، پارامترهای هیدرولیکی آبخوان از تجزیه و تحلیل آزمون پمپاژ مشتق می‌شود. باید پارامترهای هیدرولیکی لایه‌های ضخیم نیمه تراوا تخمین زده شود. بنابراین، ذخیره الاستیک خاص آنها محاسبه گردید. این مقادیر با مقایسه فرونشست مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در منطقه حداکثر افت تایید شدند. ثابت شده فرونشست حاصل از پمپاژ در پایین آبخوان نیمه محبوس متفاوت‌تر از فرونشست ناشی از پمپاژ در بالای آبخوان نیمه محبوس است. در مرحله اول سناریو تغییر شکل فرونشست حاصل از پمپاژ در پایین آبخوان نیمه محبوس و برای مرحله دوم پمپاژ در بالای آبخوان نیمه محبوس محاسبه شده است. تکامل و گسترش جانبی فرونشست ناشی از هر دو پمپاژ بسیار متفاوت است. در فاصله نسبتاً زیادی از چاه و پس از یک دوره طولانی از پمپاژ، نشست در پایین آبخوان نیمه محبوس برابر با فرونشست ناشی از پمپاژ در بالای آبخوان نیمه محبوس است. نشست در فواصل کوتاه‌تر از چاه پمپ، برای اولین مورد چند بار کوچکتر نسبت به مورد دوم است. این مطالعه باید به عنوان اولین تلاش به منظور شناسایی عددی نشست ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی از سفره‌های آب نیمه محبوس فلاندر جنوب غربی در نظر گرفته شود. در ادامه مرحله، این نشست باید با توجه به محاسبه تنش وابسته به پارامترهای هیدرولیکی درمان شود (Lebbe, 1995).

فرونشست زمین به دلیل برداشت آب‌های زیرزمینی همراه با افزایش جهانی سطح دریا یک مشکل جدی زیست‌محیطی در منطقه ساحلی ایجاد می‌کند. استخراج آب‌های زیرزمینی منجر به تغییر فشار سیال در لایه‌ها می‌شود. تغییرات فشار در لایه‌ها باعث تراکم زمین به صورت الاستیک و غیرالاستیک می‌شود. اگر سطح آب دوباره افزایش یابد تراکم الاستیک می‌تواند بازیافت شود اما تراکم غیرالاستیک دائمی است. در این مطالعه از واکنش آب‌های زیرزمینی به تغییرات فشار هوا به منظور برآورد تراکم الاستیک استفاده می‌شود. ضریب ذخیره، ذخیره ویژه و دیگر اطلاعات هیدرولوژیکی به منظور تخمین تراکم غیرالاستیک لایه‌ها به علت خروج سیال استفاده می‌شوند. روش‌های مورد بحث به منظور برآورد پیش‌بینی پتانسیل فرونشست ناشی از استحصال بیش از حد آب‌های زیرزمینی در جنوب نیوجرسی

به کار برده شده‌اند. در حال حاضر، اگر روند افت سطح آب ادامه یابد به طور متوسط فرونشست در جنوب نیوجرسی آمریکا در مجاورت برخی از چاه‌های مشاهده‌ای در حدود ۳ سانتی‌متر در ۲۰ سال آینده خواهد بود. افزایش جهانی سطح آب دریا به طور متوسط ۲ میلی‌متر در سال است به علت شیب ملایم در سمت جنوب نیوجرسی ترکیبی از فرونشست و بالآمدگی سطح دریا به طور بالقوه این معنی را تداعی می‌کند که مقدار قابل توجهی از زمینهای ساحلی منطقه در هر دوره ۲۰ ساله از دست می‌رود. همچنین این ترکیب باعث سرعت بخشیدن به فرکانس جاری شدن سیل ساحلی و نرخ فرسایش دشت ساحلی نیوجرسی می‌شود که یک تهدید جدی برای اقتصاد ساحلی منطقه به شمار می‌رود (Sun et al., 1999).

شهر مکزیکو سیتی دارای رشد جمعیت نجومی است جمعیت آن از ۱ میلیون نفر در سال ۱۹۲۲ به نزدیک ۱۰ میلیون نفر در سال ۱۹۸۰ و در حال حاضر با حومه به حدود ۲۵ میلیون رسیده است. تأمین آب شهر، از طریق برداشت آب از آبخوان با نرخی بالاتر از تغذیه طبیعی صورت می‌گیرد. لایه‌های زیر سطحی آبخوان این شهر از لایه‌های متناوب سیلت و ماسه و سپس لایه رسی با ضخامت متغیر حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر تشکیل شده است. نشست زمین در اثر تحکیم این لایه رخ می‌دهد. در زیر اکی تارد رسوبات آبرفتی آبدار به ضخامت ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر قرار دارد که آبخوان اصلی شهر را تشکیل می‌دهد. نشست زمین در برخی نقاط این شهر تا سال ۱۹۹۱ به ۸ متر رسید اما اگر برداشت آب با همین روال ادامه یابد در سال ۲۰۱۰ نشست زمین به حدود ۱۵ متر خواهد رسید. چنانچه با مدیریت صحیح از افت سطح آب جلوگیری شود تا این سال مقدار نشست به کمتر از ۱۰ متر کاهش خواهد یافت (Guerrero et al., 1999).

دره آنتلپ، کالیفرنیا، از لحاظ توپوگرافی حوضه بسته در بخش غربی صحرای موهاوی، حدود ۵۰ مایلی شمال شرق لس آنجلس است. آب زیرزمینی قبل سال ۱۹۷۲، بیش از ۹۰ درصد از کل عرضه آبی دره و از سال ۱۹۷۲ بین ۵۰ تا ۹۰ درصد آن را فراهم کرده است. اکثر پمپاژ آب‌های زیرزمینی در دره آنتلپ حوضه آب‌های زیرزمینی، که شامل شهرهای به سرعت در حال رشد Lancaster و



Palmdale است، رخ می‌دهد. کاهش بیش از ۲۰۰ فوت سطح آب زیرزمینی در برخی از بخش‌های حوضه آب زیرزمینی در اثر افزایش توسعه پمپاژ به کاهش بهره‌وری چاهها و فرونشست زمین بیش از ۶ فوت در بعضی از مناطق منجر شده‌اند. رشد شهری در آینده و محدودیت در عرضه آب وارداتی همچنان اتکاء به آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد. برای درک بهتر سیستم جریان آب‌های زیرزمینی و به منظور توسعه یک ابزار برای کمک به مدیریت موثر منابع آب، مدل عددی جریان آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در حوضه دره آنتلپ آب‌های زیرزمینی با استفاده از اطلاعات ژئوهیدرولوژی قدیمی و جدید توسعه داده شده است (Leighton et al., 2003).

اولین تلاش برای کنترل برداشت آب‌های زیرزمینی در نزدیکی ونیز در سال ۱۹۶۹ انجام شد. پس از آن بر طبق گزارشات نرخ فرونشست زمین آهسته شده است. به طور کلی این شهر در قرن گذشته ۲۳ سانتی‌متر از ارتفاع خود را از دست داده است. بیشترین میزان نشست مربوط به فعالیتهای انسانی، بین سالهای ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ رخ داده که در آن زمان بیشترین افت سطح آب زیرزمینی گزارش شده است (Brambati et al., 2003).

نشست زمین به دلیل پمپاژ آب زیرزمینی در طی ۳۵ سال گذشته، در شهر بانکوک، تایلند اتفاق افتاد. حداکثر میزان نشست سالیانه در این شهر ۱۲۰ میلی‌متر و در اوایل دهه ۱۹۸۰ گزارش شده است. بررسی داده‌ها ارتباط مستقیمی را بین فرونشست و ۶۵ متر افت سطح آب در پیرومترها نشان می‌دهد (Phien-wej et al., 2006).

جاکارتا شهری در پایتخت اندونزی، با جمعیت حدود ۱۲ میلیون نفر ساکن منطقه در مساحتی حدود ۶۲۵ کیلومتر مربع است. به خوبی شناخته شده است که مناطق مختلفی در جاکارتا به سرعت در حال فرونشینی است. چهار نوع مختلف از فرونشست زمین در حوضه جاکارتا عبارتند از: فرونشست به علت استخراج آب‌های زیرزمینی، فرونشست ناشی از بار ساخت و ساز (به عنوان مثال: نشست خاک با قابلیت تراکم‌پذیری بالا)، فرونشست ناشی از تحکیم طبیعی خاک آبرفتی و فرونشست تکتونیکی. فرونشست مشاهده شده در بخش ساحلی، غرب و شمال شرق جاکارتا ناشی از استخراج آب‌های

زیرزمینی عمیق (همراه با کاهش فشار آب در آبخوان یا سطح پیزومتریک)، ایجاد می‌شود. سطح پیزومتری در شمال جاکارتا با ارتفاع ۱۲/۵ متر بالاتر از سطح دریا در سال ۱۹۱۰ به حدود سطح دریا در دهه ۱۹۷۰ و سپس به طور قابل توجهی عمیق تر شده است به ۳۰-۵۰ متر زیر سطح دریا در دهه ۱۹۹۰ تغییر کرده است. علاوه بر این از روش ترازیبی سیستم مکان‌یابی جهانی (GPS)، برای مطالعه فرونشست زمین در جاکارتا استفاده شده است. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده بین سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۵، نرخ فرونشست حدود ۱-۱۰ سانتی‌متر در سال تخمین زده شده است. درک ارتباط کامل بین فرونشست زمین و استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی در حوضه به اطلاعات و بررسی بیشتری نیاز دارد (Abidin et al., 2007).

استخراج بیش از حد و طولانی مدت از آب‌های زیرزمینی باعث نشست قابل توجه سطح زمین در نواحی مسکونی حوضه معدن ذغال دیتون (Datun) شرق چین شده است. مشاهدات ثبت شده از سال ۱۹۷۶ در سایت‌های مانیتورینگ منطقه، میانگین سالانه فرونشست را میزان ۲۷/۵۸ میلی‌متر نشان داده‌اند و تا پایان سال ۲۰۰۶ حداکثر فرونشست تجمعی به ۸۶۳ میلی‌متر رسیده است. در چین خسارات وارده به ساختمان به چهار سطح مختلف تقسیم شده است.

براساس اقدامات قابل مشاهده مانند عرض دیوار کرک، درجه تغییر شکل درب و پنجره، درجه تمایل دیوار و درجه تخریب ساختاری و با استفاده از تجزیه و تحلیل تغییر شکل زمین سطح خسارات ساختمان (BDL) برآورد شده است. تخریب فرونشست زمین در سطوح مختلف ساختمان و زیرساخت‌ها برآورد شده است متأسفانه سطح خسارت ساختمان در برخی نواحی به (BDL III) رسیده است (Feng et al., 2008).

ناحیه سوخی چانگ (Su-Xi-Chang) و شهر شانگهای در کشور چین در جنوب دلتای یانگ تسه قرار دارد که به علت پمپاژ بالای آب زیرزمینی (در صد سال اخیر) نشست کرده است. در نتیجه برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی مخروط افت بزرگی در آبخوان ناحیه بوجود آمده است. سطح منطقه فرونشست تابع مخروط افت است که قسمت مرکزی شهر شانگهای و ناحیه سوخی چانگ را در

بر می‌گیرد. اولین گزارش بزرگترین اثر و آسیب فرونشست در سال ۱۹۲۱ از شهر شانگهای بود. همچنین در سال ۲۰۰۲، حداکثر فرونشست تجمعی شانگهای ۲/۶۳ متر و سوخی چانگ ۲/۰۰ متر اعلام شد. در این مقاله روش دو مرحله‌ای شامل مدل جریان سه بعدی با پارامترهای متغیر و مدل فرونشست یک بعدی (عمودی) با روش اجزاء محدود (Finite Element Method) بررسی شد. جفت مدل جریان و مدل نشست که نشان‌دهنده تأثیر فرونشست بر پارامترهای هیدرولوژیکی، موضوعی جدید است مدل جریان آب زیرزمینی و مدل فرونشست باید با هم در تئوری حل شوند که مدل فرونشست زمین همانند مدل Biot کاملاً دوتایی نامیده می‌شود.

با این حال، مدل سازی کاملاً دوتایی به دلیل استفاده از تعداد زیادی پارامتر و عوارض با توجه به تغییر شکل غیرالاستیک مشکل است. از این رو نام مدل دو مرحله‌ای یا مدل جفت نشده (Uncoupled) توسعه داده شد، که در ابتدا بار هیدرولیکی و سپس تغییر شکل را محاسبه کند. مدل سازی برای انجام مدیریت مانند محدود کردن بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی برای کنترل توسعه فرونشست زمین الزامی است (Shi et al., 2008).

### ۳-۲-۲- مطالعات در ایران

پژوهش در خصوص فرونشست در ایران قابل قیاس با تحقیقات جهانی نمی‌باشد. این پژوهش‌ها در حد توصیفی بوده و به دلیل فقدان یک برنامه‌ریزی سیستماتیک و پیوسته نتوانسته اهداف مشخصی را دنبال نماید. در کشور ما چاه‌های پیرومتریک معمولاً توسط سازمان‌های آب منطقه‌ای حفر و عمق آب زیرزمینی و نوسانات آن به طور ماهانه برداشت می‌شود که در این خصوص نیز کمبودهایی دیده می‌شود (اسکندری، ۱۳۸۷). در سال‌های اخیر نشست زمین همراه با افت سطح آب‌های زیرزمینی در خیلی از آبخوان‌های کشور گزارش گردیده است. آمار دشت‌های کشور که در آن نشست زمین گزارش گردیده شامل ۲۰۹ دشت می‌باشد.

دشت مهیار یکی از مهمترین دشت‌های استان اصفهان از لحاظ توسعه کشاورزی به شمار می‌آید. در اولین بررسی این دشت یک رشته شکاف به طول ۱۰ کیلومتر و به عرض ۵ تا ۵۰ سانتی‌متر شناسایی شد که از سال ۱۳۶۷ هر سال ۵ سانتی‌متر بازتر می‌شود. فقط در قسمت جنوبی دشت در اثر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۶ با پدیده فرونشست با نرخ متوسط ۸/۲ سانتی‌متر در سال مواجه بوده است (اجل‌لوئیان و بهادران، ۱۳۷۷؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۱).

در دشت کبودرآهنگ و فامنین در استان همدان نیز پدیده فرونشست زمین و تشکیل فروچاله‌ها در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی گزارش شده است (فاطمی عقدا و همکاران، ۱۳۸۰).

نشست زمین در منطقه کرمان از سال ۱۳۵۶ با مراجعه کشاورزان و اعلام این موضوع که لوله‌های جدار چاه‌های کشاورزی آنان از سطح زمین خارج شده و به اصطلاح رشد می‌کنند، شناسایی و مورد بررسی قرار گرفت. در نتیجه بررسی‌ها متوسط افت سطح آب زیرزمینی در منطقه رفسنجان در فاصله سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۷۱ حدود ۱۲ متر، در منطقه سیرجان حدود ۸ متر و در منطقه زرنند حدود ۱۵ متر گزارش گردیده است. در نواحی مرکزی دشت رفسنجان افت سطح آب سالانه بیش از یک متر است. سطح زمین در حال حاضر به طور متوسط در مناطق کرمان، زرنند، رفسنجان و سیرجان با سرعت حدود ۱۰ سانتی‌متر در سال نشست می‌کند و بدیهی است که در چند دهه اخیر با افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی، سرعت نشست زمین این مقدار نبوده است و بالعکس در آینده با توجه به افت مداوم سطح آب، نشست زمین با آهنگی به مراتب سریعتر از اکنون صورت خواهد گرفت (اوریا، ۱۳۸۳).

دشت لردگان یکی از مهمترین دشت‌های استان چهارمحال و بختیاری می‌باشد. آثار نشست در دشت لردگان مربوط به عکس‌العمل طبیعی آن در مقابل بهره‌برداری بیش از اندازه از منابع آب‌های زیرزمینی است. کاهش سطح آب زیرزمینی در سفره آبخوان موجب متراکم شدن سفره شده، این تراکم نتیجه رابطه ساده بین کاهش سطح ایستابی و افزایش استرس عمودی ناشی از عدم تحمل بار طبقات بالایی توسط آبخوان است. مقدار نشست زمین برای هر متر افت سطح آب بین ۵ تا ۱۵

سانتیمتر متغیر است که دامنه این تغییرات به ضخامت و تراکم پذیری لایه‌ها، طول زمان بارگذاری، درجه و نوع استرس بستگی دارد. بیشترین افت سطح آب زیرزمینی در این منطقه در طی سال‌های ۷۹ تا ۸۱ برابر با ۴ متر بوده است (سوری و همکاران، ۱۳۸۸).

دشت‌های گرمسار و ایوانکی در حاشیه جنوبی البرز مرکزی کویر قرار گرفته و مناطق مرتفع و حوضه‌های مرکزی را به هم ارتباط می‌دهند به دلیل وجود آبرفت‌های حاصل از فرسایش کوه‌های البرز توانسته است سفره‌های آبخوانی را تشکیل دهد. کاهش حداقل ۲۷ متر از سطح آب آبخوان‌ها، بر اساس برآوردها و محاسبات حدود ۵۰-۶۰ سانتی‌متر نشست کلی را در زمین‌های منطقه باعث شده و طی بیست سال آینده نیز در حدود ۲۰-۳۰ سانتی‌متر نشست پیش‌بینی می‌شود (عبادت‌ی، ۱۳۸۹).

دشت هشتگرد در استان تهران از رسوبات آبرفتی سازند کهریزک و تهران با نفوذپذیری زیاد تشکیل شده است که قابلیت هدایت هیدرولیکی بالایی دارند. فرونشست زمین فقط در پهنه سازند آبرفتی تهران شکل گرفته است و در پهنه سازند کهریزک مشاهده نمی‌شود. بهره‌برداری بی‌رویه از آبخوان تحت فشار و آبخوان آزاد شمال دشت که تنها منبع اصلی تغذیه آبخوان تحت فشار است، موجب شکل‌گیری فرونشست زمین در این منطقه شده است. با استفاده از روش تداخل سنجی ماهواره‌ای امواج رادار (InSAR) فرونشست زمین با نرخ بیشینه ۱۶ و نرخ متوسط ۸/۴ سانتی‌متر بر سال شناسایی گردیده است (شمشکی و همکاران، ۱۳۹۰). مطالعاتی در جهت شناسایی و تأیید فرونشست در سایر دشت‌ها نیز انجام شده است. از جمله می‌توان به دشت سیستان (رهنماراد و فیروزان، ۱۳۸۱)، دشت کاشمر در استان خراسان رضوی (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۵)، دشت اسد آباد در استان همدان (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۶c) و دشت نیشابور (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۶b) و دشت اشتهاورد (رنجبر و همکاران، ۱۳۸۸) را اشاره کرد. موارد فوق نمونه‌هایی از نشست زمین در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی در کشور است. امروزه این پدیده بر اثر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی همراه با خشکسالی‌های زیاد، به ویژه در نقاط خشک و کم باران گزارش شده است.

## ۳-۲-۳- مطالعات در دشت مشهد

روند افزایش جمعیت شهری همراه با افت سطح آب زیرزمینی و کاهش تراز سطح هیدرواستاتیک آبخوان دشت مشهد، به طور متوسط ۱/۲ متر در سال و اضافه برداشت معادل ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال و منفی شدن بیلان آبی دشت مشهد در اثر ایجاد عدم توازن در تغذیه و برداشت از معدود مشکلاتی است که سفره آب زیرزمینی را با بیش از ۲۱ درصد کمبود مواجه ساخته است. روند افزایشی سالیانه کمبود تا سال ۱۴۰۰ که پیش‌بینی افزایش جمعیت ساکن شهر مشهد حدود ۴ میلیون نفر و جمعیت زائر در آن بیش از ۲۳ میلیون نفر است، به ۶۲ درصد خواهد رسید. همچنین بهره‌برداری از کلیه ظرفیت‌های آبی سطحی و زیرزمینی موجود در اطراف شهر مشهد تا شعاع ۱۷۵ کیلومتری آن و موجود نبودن منابع آبی دیگر، مجموعه این موارد یاد شده گویای این واقعیت است که سفره آب زیرزمینی دشت مشهد به وسعت ۱۰۲۶۰ کیلومترمربع به عنوان تأمین کننده اصلی آب کشاورزی، صنعت و شرب نه تنها ناکارآمدی آن در شرایط فعلی محرز است بلکه در صورت ادامه این روند مرگ دشت مشهد در پیش‌رو می‌باشد.

مرگ دشت مشهد بر اثر به اتمام رسیدن سفره آب زیرزمینی آن و نشست زمین دشت نه تنها فاجعه اقتصادی است بلکه یک فاجعه اجتماعی را نیز در پی خواهد داشت. پس علاوه بر تأمین کمبود آب شرب شهری موضوع نجات سفره آب زیرزمینی دشت نیز از نیازهای مبرمی است که همت مسئولین را می‌طلبد (آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، ۱۳۸۹).

دشت مشهد با حدود ۶۰۰۸ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق حفر شده، منابع آب زیرزمینی دشت را جهت کشاورزی، صنعتی و شرب تأمین می‌نماید.

در سال‌های اخیر روند برداشت بی‌رویه و شاید بدون برنامه، باعث افت روز افزون سطح آب زیرزمینی شده و این امر نشست زمین در این دشت را به همراه داشته به طوری که در سال ۱۳۸۵ مقدار نشست زمین به حدود ۲۴ سانتی‌متر رسیده است (حسینی و صادقی فرد، ۱۳۸۵).

بر اساس مطالعاتی در دشت مشهد اعلام نمودند میزان بهره‌برداری از آبهای زیرزمینی از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۴ به میزان ۴/۶ میلیارد مترمکعب افزایش یافته و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۳۹۹ به میزان ۲/۵ میلیارد متر مکعب دیگر نیز افزایش یابد (Nairizi and Janparvar, 2004).

افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین در دشت مشهد با هدف شناسایی و بررسی فرونشست در روستای حسن خُردو در شمال غرب شهر مشهد در نزدیک جاده مشهد- قوچان انجام گرفت. افت زیاد سطح آبهای زیرزمینی به میزان بیش از ۳۰ متر در طول ۲۴ سال آمار برداری سبب نشست زمین در این محدوده گردیده است (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۴).

اخیراً میزان نشست زمین در بخش‌هایی از دشت مشهد در حد فاصل سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵ به میزان ۹۰ سانتی‌متر در اثر افت ۱۵ متری سطح آب گزارش گردیده است (Motagh et al., 2007). بررسی افت سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) روی آبخوان دشت مشهد انجام شد نتیجه بررسی هیدروگراف‌های تراز آب نشان داد که در مجموع ۱۲/۱ متر از سال ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۷ افت سطح آب در دشت مشهد رخ داده یعنی به طور متوسط هر ساله در حدود ۶۰ سانتی‌متر تراز سطح آب کاهش یافته است. عوامل موثر در افت آب‌های زیرزمینی دشت، سبب نشست زمین در نزدیکی‌های منطقه فردوسی در بخش مرکزی و شمال غربی دشت گردیده است (اکبری و همکاران، ۱۳۸۸).

بررسی نشست حاصل از تراکم خاک‌های دستی در غرب شهر مشهد نشان داد دلیل نشست زیاد زمین تراکم آبی خاک‌های دستی در اثر ورود فاضلاب خانگی بوده است. بر اساس پژوهش‌های ژئوتکنیک و ژئوالکترونیک مشخص شد که حداکثر ضخامت خاک دستی ۹ متر است و میزان نشست احتمالی آن با توجه به آزمایش‌های رمبندگی ۷۵ سانتی‌متر تعیین گردید. تمامی محدوده غرب مشهد از جمله امامت، قاسم آباد، الهیه دارای پتانسیل نشست ارزیابی شدند (حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۹۱).

### ۳-۳- ارزیابی فرونشست زمین بر اساس مدل سازی

با گذشت زمان افت ممتد سطح آب زیرزمینی و فرونشست می تواند باعث بروز مشکلات در مناطق مسکونی از قبیل افزایش فشار اعمال شده از خروج آب بر سازه های زیرسطحی (گسیختگی سیستم خطوط لوله های آب، نفت و گاز) شود از طرفی با ایجاد شکاف های کششی طویل موجب آسیب زدن به جاده ها و فونداسیون سازه ها می گردد. امروزه مدل سازی تراز سطح آب زیرزمینی به منظور حفاظت از محیط زیست، حفظ تعادل سیستم آبخوان، کنترل نوسانات سطح آب و حفاظت در برابر پدیده های مخرب مانند فرونشست های شدید انجام می گیرد.

### ۳-۳-۱- مروری بر مطالعات مدل سازی آبخوان ها در جهان

شروع مطالعات و تحقیقات در زمینه مدل و مدل سازی به سال های آغازین قرن بیستم برمی گردد. دوره جدید هیدرولوژی آب های زیرزمینی در سال ۱۹۳۵ با معادله تاپس آغاز گردید. در دهه های ۴۰ و ۵۰ میلادی هانتوش و ژاکوب با ارائه روابط خود در حل مسائل جریان چاه ها شناخته شدند. هرب اسکوییتزکی و باب بنت (Bennet and Skivitzke, 1950) در سازمان زمین شناسی ایالت متحده (USGS) یک سیستم آبخوان کامل را با استفاده از فن آوری رایانه ای آنالوگ مورد بررسی قرار دادند. این دو با استفاده از شبیه ساز الکتریکی که مجموعه ای از مقاومت ها و اسیلوسکوپ ها بود و بر اساس روش تفاضل محدود عمل می کرد، آبخوان را مدل سازی الکتریکی نمودند. یکی از مزایای این شبیه سازی در این بود که تفکیک زمانی صورت نمی گرفت و زمان پیوسته بود که موجب می گردید این مدل بی قید و شرط پایدار باشد. در اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی سازمان USGS یک آزمایشگاه شبیه سازی رایانه ای را در فونیکس (Phoenix) ایالت آریزونا دایر نمود (صدقی، ۱۳۸۴). با وارد شدن ماشین های حساب گر قدرتمند در دهه ۶۰ و ۷۰ میلادی به دنیای علوم، بخصوص هیدروژئولوژی، محاسباتی که قبلا بسیار وقت گیر و غیر ممکن بود آسان گردید. پس از آن استفاده از مدل های ریاضی



با راه حل عددی به عنوان یکی از روش‌های مناسب در مطالعات هیدروژئولوژی بکار گرفته شد و دو راه حل عددی تفاضلات محدود<sup>۱</sup> و عناصر محدود<sup>۲</sup> پایه‌گذاری شد. مطالعات متعددی در چند دهه اخیر با استفاده از نرم افزارهای پیشرفته مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی مانند visual MODFLOW، GMS، SEAWAT، FEFLOW و یا ترکیبی از آنها صورت گرفته است.

به منظور مشخص کردن محدوده تغذیه چاه‌های آب شرب استراگون‌بای در ویسکونسین (Wisconsin) آمریکا، آب‌های زیرزمینی این منطقه توسط MODFLOW در دو حالت ماندگار و ناماندگار شبیه‌سازی گردید (Todd and Kenneth, 2001).

امروزه مدل‌سازی و شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی دامنه وسیعی از امور مربوط به تصمیم‌گیری و اهداف مدیریتی منابع آبی را در بر می‌گیرد. با استفاده از کد رایانه‌ای MODFLOW و GMS، آبخوان شهر موصل را به روش مدل مفهومی شبیه‌سازی کردند؛ هدف از این شبیه‌سازی، تعیین مسیر و سرعت جریان آب زیرزمینی در آبخوان شهر جهت طراحی شبکه زهکشی مناسب به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بوده است (Abdulghani and Thair, 2006).

آبخوان Trifa واقع در Morocco با هدف بررسی تأثیر توسعه کشاورزی بر منابع آب زیرزمینی منطقه توسط مدل‌های MODFLOW و مدل هیدرولوژیکی WetSpas، برای تخمین تغذیه از آب‌های زیرزمینی شبیه‌سازی گردید و نتایج این مطالعات جهت پیش‌بینی ظرفیت مخزن آب زیرزمینی و ارزیابی اقدامات مدیریتی ممکن، مفید واقع شد (El Idrysy and Smedt, 2006).

هرزاگ، با استفاده از کد MODFLOW در نرم افزار GMS به بررسی اثر سیستم تخلیه فاضلاب شهری بر روی آب‌های زیرزمینی کم عمق در منطقه شهری کامپالا (Kampala) در اگاندا پرداخت (Herzog 2007).

با تلفیق MODFLOW و نرم افزار GIS جریان آب زیرزمینی در شمال چین شبیه‌سازی شد (Wang et al., 2007).

<sup>1</sup> Finite Difference

<sup>2</sup> Finite Element

برای آبخوان آزاد دشت Bou-Areg، واقع در ساحل دریای مدیترانه در شمال شرق مراکش، اقدام به اجرای مدل سه بعدی تفاضل محدود جریان آب زیرزمینی به وسیله مدل MODFLOW نمودند. نتایج ایشان نشان داد که هد هیدرولیکی آبخوان موردنظر وابسته به نفوذ طبیعی بارندگی و آب برگشتی کشاورزی است (Yaouti et al., 2008).

در نزدیکی منطقه داروین در استرالیا جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW و مدل انتقال آلودگی MT3D با بررسی سناریوهای مختلف به منظور پیش‌بینی مدت زمان انتقال و اوج غلظت فلز روی (Zn) در محل تخلیه آب‌های زیرزمینی کم عمق به نزدیکترین رود، در معدن سرب و روی وودکاتر (Woodcutters) انجام شد (Wels and Findlater, 2009).

با استفاده از کد رایانه‌ای MODFLOW و GMS، یک آبخوان سازند سخت در جنوب شرقی غنا را در شرایط پایدار شبیه‌سازی کردند. هدف از این شبیه‌سازی، تخمین پارامترهای هیدروژئولوژیکی منطقه و تخمین میزان تغذیه آبخوان بوده است (Yidana et al., 2011).

دینامیک جریان آب زیرزمینی و تغییرات سطح آب با استفاده از Visual MODFLOW در منطقه تانگلیائو (Tongliao) چین بررسی شد (Yang et al., 2011). در دهه اخیر مطالعات زیادی به بررسی نوسانات سطح ایستابی و شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی پرداخته‌اند (Miller, 2000; Zuquette et al., 2005; Shaki and Adeloeye, 2007; Mylopoulos et al., 2007; Froukh, 2002).

### ۳-۲-۳- مروری بر مطالعات مدل‌سازی آبخوان‌ها در ایران

مطالعات مدل‌سازی در ایران برای اولین بار در سال ۱۳۴۸ صورت گرفت. در پی این اقدام مدل ریاضی دشت ورامین تهیه گردید (به نقل از کوهستان نجفی، ۱۳۷۹). بعدها تا سال ۱۳۶۰ حدود ۲۰۰ آبخوان با مساحتی حدود ۵۵۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع در مرحله شناخت و حدود ۸۰ آبخوان با مساحتی در حدود ۲۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع در مرحله نیمه تفصیلی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعات بیشتر از روش تفاضلات محدود و چند مورد از روش برنامه‌نویسی پویا استفاده شده است.

با استفاده از مدل عناصر محدود آبخوان دشت مهیار، شبیه‌سازی و مقدار هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آن را بهینه نمودند (چیت سازان و توسلی، ۱۳۷۷).

کمبرود آب کشاورزی در دشت رامهرمز استان خوزستان کارشناسان را به مطالعه منابع آب این دشت با مدل ریاضی واداشت. پس از تهیه، مدل مورد نیاز واسنجی و سپس صحت سنجی گردید بعد از تایید صحت عملکرد مدل تهیه شده جهت پیش بینی وضعیت آبخوان، تحت تأثیر گزینه‌های مختلف از جمله اجرای شبکه آبیاری و زهکشی مورد استفاده قرار گرفت (پیرهادی و چیت‌سازان، ۱۳۷۸).

با تهیه مدل تفسیری محدوده با استفاده از MODFLOW و اعمال استراتژی واسنجی مناسب مشخص گردید که پارامترهای کالیبره شده برای منابع آب زیرزمینی دشت زنجان نسبت به بیلان تهیه شده توسط مرکز تحقیقات منابع آب، مقادیر بزرگتری دارا می‌باشد. همچنین بیلان حجمی محاسبه شده توسط مدل ریاضی منفی نبوده و با وضعیت هیدروگراف واحد آبخوان (مثبت بودن هیدروگراف آبخوان) همخوانی دارد (کوهستان نجفی، ۱۳۷۹).

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی دشت فشافویه در جنوب غرب استان تهران با استفاده از مدل MODFLOW انجام شده که مقایسه روند تغییرات هیدروگراف چاههای مشاهده‌ای و نتایج محاسباتی مدل و همچنین منحنی‌های هم تراز محاسبه‌ای و مشاهده‌ای نشان می‌دهند که مدل در طول دوره تطبیق و اعتبار خود در حد خیلی خوبی واسنجی شده است. مدل تهیه شده قادر به ارائه بیلان آبی منطقه‌ای و زیرمنطقه‌ای است و می‌توان از آن به عنوان یک مبنای مناسب برای ساخت مدل منابع آبی دشت فشافویه در دوره‌های بلند مدت بهره‌گرفت (رسولی، ۱۳۸۰).

به منظور محاسبه بیلان آبخوان دشت عجب شیر با پیوند GIS و MODFLOW بواسطه اینترفاز GMS، مدل ریاضی دشت برای دو حالت پایدار و ناپایدار تهیه شده و به این نتیجه رسیده است که در بخش‌های جنوبی دشت در فصول کم آبی، جریان معکوس (از سمت دریاچه ارومیه به طرف آبخوان) می‌باشد (شهسواری، ۱۳۸۲).

مدل‌سازی هیدرولیکی آبخوان یاسوج، پخش و انتقال آلودگی در آن به کمک نرم افزار PMWIN

نشان دهنده مثبت بودن بیلان سالانه آب زیرزمینی و بالا بودن پتانسیل استحصال آب زیرزمینی در دراز مدت این دشت است اما نتایج بررسی مدل سازی کیفی، تأثیر زیاد چشمه های پر آب منطقه بر حرکت ذرات (آلاینده ها) در دشت می باشد که این امر در دراز مدت اثرات بسیار خطرناکی را بر جای می گذارد (سعیدی فر، ۱۳۸۳).

آبخوان دشت گتوند در شهرستان شوشتر با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و نرم افزار PMWIN شبیه سازی شده و استفاده از مدل سازی معکوس و بهینه سازی پارامتری، ابزاری مناسب برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی و توزیع صحیح آن ها در محدوده مطالعاتی معرفی شده است. توزیع مقادیر هدایت هیدرولیکی در دشت از روند یکنواختی پیروی نمی کند که دلیل این تغییرات زیاد را وجود سازندهای گچساران، آغاچاری و بخش لهبری و ایجاد ناهمگنی توسط رسوبات آن ها در دشت معرفی شده است (مظفری زاده و همکاران، ۱۳۸۵).

محققین مدل سازی آبخوان شیراز را که با معضل بالا آمدگی سطح آب همراه است به منظور بررسی تأثیر زهکش هایی که بر روی سطح آب زیرزمینی تعبیه شده اند با استفاده از کد کامپیوتری MODFLOW شبیه سازی نمودند (زارع ابانیه و همکاران، ۱۳۸۵).

به منظور بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی و بررسی تأثیر شبکه آبیاری سد بارزو بر تغذیه آبخوان شیروان این آبخوان با استفاده از PMWIN شبیه سازی گردید. بر اساس نتایج مدل، بیلان آبخوان برای سه سال واسنجی روندی افزایشی داشته که علت آن گسترش شبکه آبیاری سد و افزایش بارندگی می باشد (محمدی و کرمی، ۱۳۸۶).

با استفاده از نرم افزار GMS مدل ریاضی دشت فیروزآباد تهیه شد و با استفاده از آن به تصحیح پارامترهای هیدرولیکی آبخوان پرداختند (عسکری مارنانی و همکاران، ۱۳۸۸).

با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW، جریان آب زیرزمینی در دشت کبودرآهنگ در استان همدان شبیه سازی شد. نتیجه مقایسه بیلان محاسباتی مدل با بیلان دستی منطقه نشان می دهد مدل از دقت مناسبی برخوردار است. با توجه به بهترین رابطه رگرسیون در تمام ماه ها و پیزومترها با

ضریب نکوئی برازش ۰/۹۹ برای این منطقه می توان مدل ارائه شده را به عنوان ابزاری جهت کاربردهای مختلف از قبیل شبیه سازی، شناخت انتشار آلودگی در سفره آب زیرزمینی و تعیین بیلان در سال‌های مختلف استفاده نمود (طاهری تیزرو و همکاران، ۱۳۹۰).

آبخوان دشت بزمان که یکی از زیر حوضه‌های هامون - جازموریان است با استفاده از نرم افزار GMS طی شرایط پایدار و ناپایدار شبیه‌سازی شد و دو فاز مدیریتی بهینه بهره‌برداری آب از آبخوان را پیشنهاد کردند، که یکی کاهش نرخ پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری و دیگری مکان‌یابی چاه‌های جدید جهت تأمین آب مورد نیاز در اثر اجرای فاز اول مدیریت آبخوان است. در نهایت تأثیر این فاز مدیریتی بر آبخوان را از لحاظ جنبه‌های اقتصادی با استفاده از کد کامپیوتری GWM مورد ارزیابی قرار داده‌اند (مهدوی، ۱۳۹۰).

دشت شاهرود با هدف پیش بینی تأثیر اجرای طرح جمع آوری فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی با استفاده از نرم افزار GMS شبیه سازی شد. با واسنجی مدل در شرایط پایدار پارامترهای هیدرولیکی آبخوان بهینه گشت و سطح آب زیرزمینی برای قبل و بعد از اجرای طرح فاضلاب با ترسیم هیدروگراف دشت پیش بینی شد نتیجه این که اجرای طرح تأثیر مستقیم در سطح آب زیرزمینی دارد و باعث افت سطح آب می‌گردد (ملکی و کرمی، ۱۳۹۰).

جریان آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت بجنورد با استفاده از کد MODFLOW2000 در اینترفاز GMS8.0 با تأکید بر تغییرات اقلیمی شبیه‌سازی و با تعریف سناریوهای مدیریتی مختلف، رفتار هیدرولیکی آبخوان دشت بجنورد پیش‌بینی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط ترسالی سطح آب زیرزمینی در بخش شمالی شهر بجنورد به کمتر از ۴ متر می‌رسد که می‌تواند باعث بروز مشکلات جدی برای ساکنان این منطقه شود (الطافی دادگر و همکاران، ۱۳۹۱).

آبخوان دشت اشنویه در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان ارومیه و در استان آذربایجان غربی، به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آبی دشت توسط نرم افزار GMS شبیه‌سازی شد. بر اساس نتایج پیش‌بینی صورت گرفته، از مهر ۹۱ تا مهر ۹۴، بخش‌های شرقی و خروجی دشت در اثر برداشت بی‌رویه دچار

افت گردیده‌اند بنابراین پمپاژ آب، بهتر است از بخش‌های غربی و شمالی دشت که وضعیت بهتری دارند، انجام شود (بخشی پور و همکاران، ۱۳۹۱).

### ۳-۳-۳- مطالعات مدل‌سازی انجام شده در دشت مشهد

در سال ۱۳۸۳ طرح بررسی استفاده از آبهای غیرمتعارف در دشت مشهد با تأکید بر اثرات کمی و کیفی آبخوان شهر مشهد اجرا شد برای این هدف مجری طرح از کد کامپیوتری به نام MODFLOW96 استفاده کرده است. اما این مدل در سطح مدل‌سازی تفسیر کننده قرار می‌گیرد چون برای آرگانیزه نمودن داده‌ها استفاده می‌شود و نیاز مبرمی به کالیبراسیون ندارد و نمی‌توان برای پیش بینی از مدل موجود استفاده نمود. تفسیر مجدد سونداژهای ژئوفیزیکی از دیدگاه مدل‌سازی (عدم دسترسی به برداشتهای صحرائی قدیمی) برای شناخت بیشتر جنس لایه‌های آبرفت آبخوان مشهد، انجام آزمایش‌های پمپاژ، حفر چاه‌های اکتشافی جدید، بررسی آزمایش‌های پمپاژ قبلی و تصحیح مدل با توجه به نتایج مزبور، می‌تواند راه را برای انجام پیش بینی‌های آتی باز نماید (علیزاده، ۱۳۸۳).

گزارشاتی که تاکنون، درباره بحران آب در استان خراسان انتشار یافته‌اند، عامل اصلی بحران آب را، خشکسالی‌ها قلمداد نموده‌اند، در حالی که در این تحقیق معلوم شده است علاوه بر خشکسالی‌ها دلیل عمده آن، اضافه برداشتهای مستمری است که توسط چاههای عمیق، از آبخوان دشت‌ها صورت می‌گیرد. در مقایسه و تحلیل متوسط سالانه بارندگی (متحرک ۵ ساله) هر دشت، با هیدروگراف آبخوان همان دشت، سطح آب زیرزمینی حتی در سالهای مرطوب که معمولاً بالا می‌آید، همچنان به افت خود ادامه داده است. پیامدهای جبران ناپذیر بحران آب عبارتند از: بالا رفتن هزینه پمپاژ آب، شور شدن آب زیرزمینی، نشست زمین، ایجاد شکافها در سطح دشت‌ها و مشکلات زیست محیطی (ولایتی، ۱۳۸۶).

در این تحقیق سعی شده است تا با تهیه مدل ریاضی کمی و کیفی آبخوان دشت مشهد با استفاده از نرم افزار PMWIN، رفتار آبخوان با تکیه بر یون نیترات برای ۱۲ سال آینده شبیه‌سازی و پیش‌بینی گردد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که عمده دلیل افزایش این نوع آلودگی در طی سالهای اخیر، جمع‌آوری و دفع غیر اصولی فاضلاب تولیدی، توسط چاههای جاذب و نفوذ از این چاهها به آبخوان دشت مشهد بوده است. میانگین غلظت نیترات آبخوان هر سال افزایش یافته و این تغییرات غلظت به نوسانات سالانه سطح آب زیرزمینی بستگی ندارد به عبارتی دوره‌های خشک و مرطوب تأثیری بر افزایش یا کاهش نیترات آبخوان ندارند. نتیجه نهایی مدل بیانگر این است که در سالهای آتی (سال ۱۴۰۰ شمسی) مشکل آلودگی نیترات برای بخشهای عمده‌ای از مرکز و شرق دشت کماکان پابرجا بوده و غلظت آلاینده نیترات در این مناطق بیشتر از حد مجاز (۴۵ میلی‌گرم در لیتر) می‌باشد (وئوق و همکاران، ۱۳۸۸).

در این مطالعه خصوصیات فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت و تنها ۳ پارامتر مهم شامل TH، TDS و EC به عنوان عامل محدود کننده برای شرب شناخته شد. در نتیجه توزیع مکانی این سه مؤلفه با استفاده از روشهای میان‌یابی در نرم افزار GIS مورد بررسی قرار گرفت. روشهای میان‌یابی بررسی شده شامل روشهای معین (IDW و LPI) و زمین-آماری (کریجینگ و کوکریجینگ) می‌باشد که پس از آنالیز واریوگرافی و انتخاب بهترین روش بر اساس کمترین مقدار RMSE، برای فرآیند مکان‌یابی آلاینده‌ها استفاده شد. توزیع مکانی آلاینده‌ها نشان داد که در ناحیه جنوب شرقی و شمال غربی بر اساس استاندارد آب آشامیدنی ایران، آب زیرزمینی از لحاظ شرب نامطلوب است. بررسی‌ها نشان داد که این مناطق، محل دفن زباله‌های شهری می‌باشد، لذا عامل کاهش کیفیت آب زیرزمینی و افزایش آلودگی را می‌توان وجود سازند مزدوران و انباشت زباله‌های شهری در این مناطق دانست (رستمی خلج و همکاران، ۱۳۹۱).

### ۳-۴- تعریف و مراحل مدل سازی

تعریف‌های متعددی از مدل ارائه شده است. به هر سیستمی که بتواند عکس العمل آبخوان در مقابل تنش‌های وارده را نشان دهد، مدل آب زیرزمینی گفته می‌شود (Prickett, 1975).

هرگونه ابزاری که نشان دهنده تقریبی از شرایط میدانی باشد، مدل نامیده می‌شود (Anderson and Woessner 1992). به طور کلی مدل ابزاری طراحی شده برای ارائه نسخه‌ای ساده شده از واقعیت یک پدیده یا سیستم است (Wang and Anderson, 1992). مدل آب زیرزمینی سعی بر ارائه تصویری از سیستم واقعی جریان آب زیرزمینی دارد. در واقع مدل، بررسی واکنش آبخوان در مقابل تغییر متغیرهایی نظیر تغذیه طبیعی یا مصنوعی، پمپاژ، تخلیه و... را ممکن می‌سازد. به طور کلی هر سیستمی که بتواند واکنش‌های یک مخزن آب زیرزمینی را به صورت قابل فهمی ارائه کند مدل آن مخزن نامیده می‌شود. تنها پس از انجام این بررسی‌ها و تجزیه و تحلیل آنهاست که می‌توان بهترین عملکرد سیستم را مشخص نمود و با اعمال راهکارهای مناسب، مدیریت مناسبی را برای آن اتخاذ نمود. همچنین باید به این نکته اشاره کرد که ساخت مدل آب‌های زیرزمینی، کاری بسیار ظریف و دقیق می‌باشد و مستلزم داشتن داده‌های کامل و صحیح، شناخت کافی از سیستم و تبحر و تجربه در امر مدل‌سازی می‌باشد، به گونه‌ای که ضعف نسبی یکی از عوامل یاد شده می‌تواند خطاهای بزرگی را در نتایج مدل باعث شود. مجموعه عوامل یاد شده به اضافه ساده‌نگری‌ها و فرضیات مدل و نیز تقریبات وارد در محاسبات آن، باعث می‌شود تا همواره درصدی از عدم اطمینان نسبت به نتایج حاصل از مدل وجود داشته باشد. کاری که مدل انجام می‌دهد و منجر به تهیه نتایج می‌شود را شبیه‌سازی<sup>۱</sup> گویند (Prickett, 1975).

مراحل مدل‌سازی را می‌توان در چند مرحله تعیین هدف، طراحی مدل مفهومی<sup>۲</sup>، انتخاب کد<sup>۳</sup>،

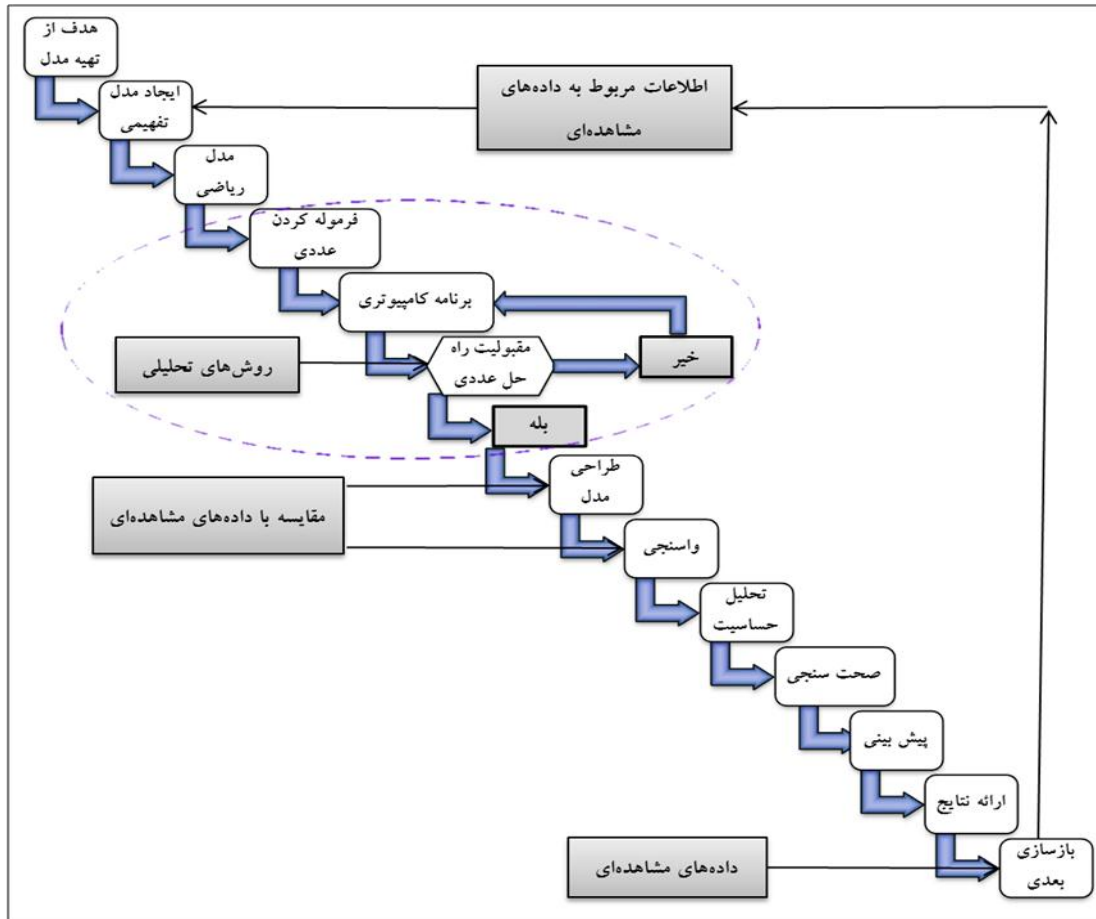
<sup>1</sup> Simulation

<sup>2</sup> Conceptual Model

<sup>3</sup> Code selection



طراحی مدل<sup>۱</sup>، واسنجی مدل<sup>۲</sup>، آنالیز حساسیت<sup>۳</sup>، صحت سنجی<sup>۴</sup>، پیش‌بینی و بازرسی مجدد<sup>۵</sup> بیان نمود شکل (۱-۳).



شکل ۱-۳- مراحل مدل‌سازی بر گرفته از (Anderson & Woessner, 1992)

### ۳-۴-۱- تعیین هدف

اولین و مهم‌ترین گام در فرآیند مدل‌سازی، تعریف شفاف و دست‌یافتنی اهداف در هر مرحله از فرآیند مدل‌سازی بر اساس نتایج مطلوب پایانی است. در این مرحله هر دو گروه یعنی تیم مدل‌سازی

<sup>1</sup> Model Design  
<sup>2</sup> Model Calibration  
<sup>3</sup> Sensitivity analysis  
<sup>4</sup> Verification  
<sup>5</sup> Post audit

و کاربر نهایی باید درک روشن و عمیقی از هدف نهایی و محدودیت‌های مدل داشته باشند. داده‌های ناقص، محدودیت‌های زمانی و ذخایر و بودجه، ساده‌انگاری در ساخت مدل را ملزم می‌سازد.

### ۳-۴-۲- طراحی مدل مفهومی

مدل مفهومی توصیف سیستم جریان آب زیرزمینی مورد نظر است که مدل‌سازی می‌شود و باید شرایط هیدرولوژی، هیدروژئولوژی و همه عوارض و محرک‌های مهم سیستم جریان شامل تغذیه<sup>۱</sup> و تخلیه<sup>۲</sup> نقطه‌ای، شرایط مرزی و ویژگی‌های ژئوفیزیکی که موجب انتقال یا عدم انتقال آب می‌شوند، چینه‌شناسی منطقه، خصوصیات هندسی آبخوان، خواص مواد و غیره برای آن تعیین شوند.

### ۳-۴-۳- انتخاب کد

بعد از تهیه مدل مفهومی و درک کلی از منطقه و شرایط موجود، باید کد کامپیوتری مناسب بر اساس معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی انتخاب شود. کد یک برنامه کامپیوتری است که شامل الگوریتمی برای حل مدل ریاضی می‌باشد.

### ۳-۴-۴- طراحی مدل

طراحی مدل، تعریف مدل مفهومی به شکل مناسب در کد است که شامل طراحی شبکه، انتخاب گام زمانی، تعیین شرایط مرزی و اولیه و تعیین مقدار اولیه برای پارامترهای آبخوان و تنش‌های هیدرولوژی است.

### ۳-۴-۵- واسنجی مدل

هدف از واسنجی، ایجاد توانایی در مدل به منظور شبیه‌سازی مقادیر بار هیدرولیکی و جریان اندازه‌گیری شده در پیمایش‌های صحرائی است. در طی این فرآیند مجموعه‌ای از مقادیر برای پارامترها و تنش‌های وارده بر آبخوان بدست می‌آید که بار هیدرولیکی و جریان در آبخوان را تقریب

<sup>1</sup> Sources

<sup>2</sup> Sinks

می‌زنند. به دلیل عدم قطعیت‌های ذاتی در اطلاعات و محاسبات، تغذیه اغلب به عنوان یک پارامتر واسنجی در نظر گرفته می‌شود که به همراه پارامترهای هیدروژئولوژی مانند هدایت هیدرولیکی تغییر داده می‌شود تا نتایج مدل بر شرایط واقعی آبخوان منطبق شود.

### ۳-۴-۶- آنالیز حساسیت

مدل واسنجی شده تحت تاثیر عدم قطعیت‌ها به سبب عدم توانایی در تعیین مقدار دقیق توزیع مکانی و زمانی پارامترها قرار دارد. همچنین تعریف شرایط مرزی و تنش‌های وارده بر آبخوان با عدم قطعیت همراه است. بنابراین آنالیز حساسیت جهت تعیین نمودن اثر عدم قطعیت‌ها بر مدل واسنجی شده انجام می‌گیرد.

### ۳-۴-۷- صحت سنجی

جهت ارزیابی توانایی مدل تهیه شده در شبیه‌سازی شرایط مختلف سیستم، لازم است که مدل واسنجی شده با استفاده از داده‌های یک دوره آماری دیگر اجرا شود. هدف از صحت سنجی، تایید پارامترهای واسنجی شده مدل با یک مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده دیگر می‌باشد.

### ۳-۴-۸- پیش‌بینی

پیش‌بینی، بررسی واکنش سیستم نسبت به وقایع آینده است. به محض این که مدل توانست تنش‌های هیدرولوژیکی و رفتار آبخوان را شبیه‌سازی نماید، برای پیش‌بینی آماده است. در این مرحله عدم اطمینان از پیش‌بینی وقایع آینده ناشی از عدم اطمینان نسبت به مدل واسنجی شده و عدم اطلاع از ارزیابی شدت و نوع حوادث آینده می‌باشد.

### ۳-۴-۹- بازرسی مجدد

در این مرحله پس از چند سال از مدل‌سازی، درصد اطمینان به پیش‌بینی‌های انجام شده مشخص می‌شود (Anderson & Woessner, 1992). گاهی منجر به ساخت مجدد مدل می‌گردد.

## ۳-۵- شرایط مرزی

انتخاب شرایط مرزی مهم‌ترین گام در تهیه مدل مفهومی می‌باشد. انتخاب شرایط مرزی نامناسب ممکن است منجر به ایجاد خطا در مدل شود و پاسخ مدل به تنش‌های وارده را متفاوت از پاسخ سیستم واقعی به تنش‌ها نماید (Frank & Collins, 1987).

در حالت ناپایدار، مرزها در صورتی بر روی پاسخ مدل تأثیر گذار خواهند بود که اثر تنش‌های وارده به سیستم جریان، به مرزها برسد. شرایط مرزی در معادلات دیفرانسیل نمایانگر یک متغیر وابسته (بار) یا مشتق متغیر وابسته (فلاکس) در مرز مدل است. سه نوع شرایط مرزی برای جریان آب زیرزمینی وجود دارد.

الف) مرز با بار مشخص که در این نوع مرز بار هیدرولیکی مشخص است.

ب) مرز با جریان مشخص که در آن جریان در عرض مرز مشخص می‌باشد.

ج) مرزهای وابسته به بار که در آن جریان در سراسر مرز از مقدار بار داده شده محاسبه می‌شود. این نوع شرایط مرزی معمولاً شرایط مرزی مرکب نامیده می‌شود.

مرزها می‌توانند فیزیکی یا هیدرولیکی باشند. مرزهای فیزیکی مرزهای طبیعی هستند مانند سنگ‌های نفوذناپذیر، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها یا سطوح نفوذناپذیر و گسل‌ها.

مرزهای هیدرولیکی، مرزهای تصویری مانند خط جریان یا خط تقسیم آب هستند. به صورت ایده آل مرزهای مدل بر اساس موانع فیزیکی در برابر جریان آب زیرزمینی بسته می‌شوند. مدلی که به این روش ساخته می‌شود در برگیرنده کل جریان ورودی به مدل از قبیل آب‌های سطحی، بارش و آب‌های برگشتی آبیاری است. در برخی شرایط، امکان گسترش محدوده مدل و انطباق مرزهای مدل به مرزهای فیزیکی وجود ندارد. در این شرایط مرزهای مدل به مرزهای تصویری بسته می‌شوند. در این موارد مرزهای تصویری باید طوری واقع شوند تا تأثیر خود را بر عدم قطعیت بر پیش‌بینی کمینه کنند. انتخاب مرزها می‌تواند بر روی عدم قطعیت مدل، تعداد دفعات اجرای مدل و ثبات عددی تأثیر گذار باشد (Wylie, 2004).

### ۳-۶- مقدار اولیه بار هیدرولیکی

به منظور واسنجی مدل آب‌های زیرزمینی، مقدار اولیه بار هیدرولیکی نیز باید برای مدل تعریف شود. با تعریف مقدار اولیه بار هیدرولیکی و سایر پارامترهای اعمال شده برای مدل، مدل می‌تواند سطح آب در هر سلول را در پایان زمان مدل‌سازی محاسبه نماید.

### ۳-۷- گسسته‌سازی مکانی<sup>۱</sup>

برای آنکه یک مدل عددی قادر به حل معادلات دیفرانسیل باشد، گسسته‌سازی مکانی منطقه مورد مطالعه ضرورت دارد. مدل برای هر گره شبکه ایجاد شده، بار هیدرولیکی را محاسبه و برای هر سلول یک معادله بیلان آب تنظیم می‌نماید. بنابراین یک سیستم از معادلات ایجاد می‌شود که سلول به سلول به صورت عددی حل می‌شوند. مقیاس مکانی شبکه از ویژگی‌های مهم می‌باشد که بر نتایج شبیه‌سازی مدل تأثیر گذار است. اندازه سلول‌ها تعیین کننده توانایی مدل برای توصیف متغیرها می‌باشد و همچنین در مقدار داده‌های ورودی مورد نیاز به مدل مؤثر است. یک شبکه با سلول‌های ریز جزئیات بیشتری از مدل می‌دهد اگر چه نیاز به اطلاعات ورودی بیشتری دارد. در قسمت‌هایی که تغییرات زیادی در بار هیدرولیکی وجود دارد، برای مثال در مجاورت چاه‌های پمپاژ، شبکه به صورت محلی تصحیح می‌شود (Anderson & Woessner, 1992).

### ۳-۸- گسسته‌سازی زمانی<sup>۲</sup>

برای حل معادله دیفرانسیل جزئی علاوه بر شبکه‌بندی مکانی، زمان نیز باید به دوره‌های زمانی کوچکتر ( $\Delta t$ ) تقسیم گردد. این عمل با در نظر گرفتن داده‌های هیدروژئولوژیکی در دسترس، تنش‌های وارده به سیستم، هیدروگراف واحد دشت و هدف مدل‌سازی صورت می‌گیرد. گسسته‌سازی

<sup>1</sup> Spatial discretization

<sup>2</sup> Time discretization

زمانی مدل با تعیین دوره‌های تنش<sup>۱</sup> و گام‌های زمانی<sup>۲</sup> مشخص می‌گردد.

### ۳-۹- معرفی نرم افزار GMS و مدول‌های آن

سیستم مدل‌سازی آب زیرزمینی (GMS)<sup>۳</sup> یک محیط کاربر گرافیکی جامع است که به منظور شبیه سازی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. سیستم GMS شامل یک رابط (Interface) کاربر کارتوگرافیکی (برنامه GMS) و تعدادی از کدهای تجزیه و تحلیل شامل MODFLOW، RT3D، MT3DMS، SEAM3D، MODPATH، SEEP2D، FEMWATER، ART3D، و UTCHEM است. رابط GMS توسط Environmental Modeling Research Laboratory از دانشگاه Brigham Young با مشارکت US Army Engineer Waterways Experiments Station تهیه شده است. در GMS انواع مختلفی از کدها پشتیبانی می‌شود و تسهیلات لازم برای به اشتراک گذاشتن اطلاعات بین مدل‌های مختلف و انواع داده‌ها، ابزارهایی برای توصیف منطقه، مفهومی سازی مدل، ایجاد شبکه و سلول، زمین آمار و پس پردازشگرها فراهم شده است.

#### کد MODFLOW 2000

GMS دارای یک رابط گرافیکی جامع برای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی با کد MODFLOW می‌باشد. MODFLOW یا (Modular groundwater flow) یک مدل سه بعدی مرکز سلول<sup>۴</sup>، تفاضل محدود و جریان اشباع است که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS)، (McDonald & Harbaugh, 1988) تهیه شده است. MODFLOW قابلیت تحلیل و آنالیز

<sup>1</sup> Stress periods

<sup>2</sup> Time steps

<sup>3</sup> Groundwater Modeling System

<sup>4</sup> Block Centered

جریان پایدار و ناپایدار را دارد. GMS به عنوان یک پیش و پس پردازشگر<sup>1</sup> MODFLOW را پشتیبانی می‌کند. اطلاعات مورد نیاز در MODFLOW توسط GMS تهیه و در فایل‌های مربوطه ذخیره می‌شود و در هنگام اجرای MODFLOW این فایل‌ها از رابط GMS فراخوانی می‌شوند.

#### – کد MT3DMS

مدلی که به شبیه‌سازی انتقال، پراکندگی و جذب آلاینده‌ها در محیط می‌پردازد.

#### – کد RT3D

یک برنامه کامپیوتری که با حل معادلات دیفرانسیل جزئی به شبیه‌سازی جریان سیالات واکنش پذیر و انتقال آلودگی در محیط متخلخل می‌پردازد.

#### – کد SEAM3D

مدل انتقال واکنشی که برای شبیه‌سازی پیچیده تجزیه بیولوژیکی مواد رادیو اکتیو و یا میرایی کلرواتن‌ها در سیستم آب‌های زیرزمینی، بر اساس کد MT3DMS می‌پردازد و از دو بسته تجزیه بیولوژیکی و بسته انحلال NAPL (فاز مایعات غیر سیال) برخوردار است.

#### – کد MODPATH

کد پیشرفته شبیه‌ساز انتقال ذرات (Particle Tracking Code) است که در اتصال با MODFLOW مورد استفاده قرار می‌گیرد. این برنامه برای شبیه‌سازی ردیابی مسیر مجموعه ای از ذرات است که می‌توان آنان را رو به جلو و یا به عقب در زمان دنبال کرد. این کد کاربردهای مختلفی، از جمله تعیین مناطق نفوذ برای چاه‌های تزریق و پمپاژ دارد.

#### – کد SEEP2D

مدلی دو بعدی برای شبیه‌سازی عبور جریان در حالت پایدار از مقاطع عرضی سدها، خاکریزها و سپرها (شمع صفحه‌ای) است که برای حل مشکلات نشت از سازه‌ها بکار می‌رود.

<sup>1</sup> Pre-Post Processore

**کد - FEMWATER**

یک مدل المان محدود سه بعدی است. شبیه سازی جریان و حمل و نقل وابسته به تراکم را در منطقه اشباع و غیر اشباع طراحی می کند. به حل مسائل نفوذ شوری می پردازد.

**کد - ART3D**

مدل تحلیلی انتقال واکنشی سه بعدی است که از نظر تأخیر، پهنرفت و واکنش عناصر چندظرفیتی را در طی واکنش های پی در پی، همگرا و واگرا مورد بررسی قرار می دهد.

**کد - UTCHEM**

کد توسعه یافته بررسی فعالیت سریع سرفکتانت (ماده فعال در سطح) برای حذف آلاینده ها در سیستم آب های زیرزمینی می باشد.

رابط GMS به یازده ماژول یا مدول<sup>۱</sup> تقسیم شده است و برای هر داده اولیه یک مدول توسط GMS پشتیبانی می شود. زمانی که از یک مدول به مدول دیگر تغییر مسیر داده می شود، منو و پالت ابزار تغییر می یابد و امکان تمرکز بر روی ابزار و دستورات مربوط به نوع داده هایی را که در فرآیند مدل سازی استفاده می شوند، داده می شود. در صورت لزوم برای تسهیل استفاده هم زمان از چندین نوع داده، تغییر مسیر از یک مدول به دیگری بلافاصله انجام می شود. در ادامه مدول هایی که در GMS پشتیبانی می شود بصورت مختصر شرح داده شده است.

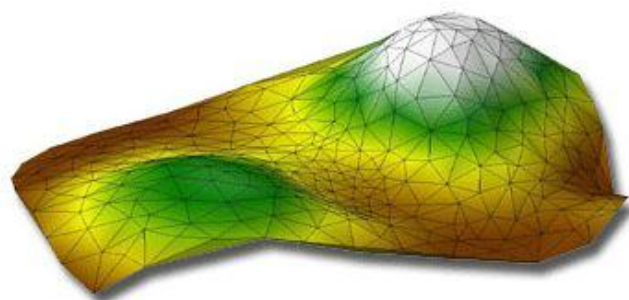
**۳-۹-۱ - TIN Module**

TIN<sup>۲</sup>، مخفف شبکه نامنظم مثلثی است. TIN، برای مدل سازی سطح بکار می رود و از اتصال حاشیه یک سری نقاط دارای مختصات xyz به شکل شبکه های مثلثی شکل ایجاد می شود. ارتفاع و دیگر مقادیر در ارتباط با TIN ها، توسط خطوط کنطوری نشان داده می شوند (شکل ۳-۲).

<sup>۱</sup> Module

<sup>۲</sup> Triangulated Irregular Network





شکل ۳-۲- نمایش سطح مدل شده در مدول TIN

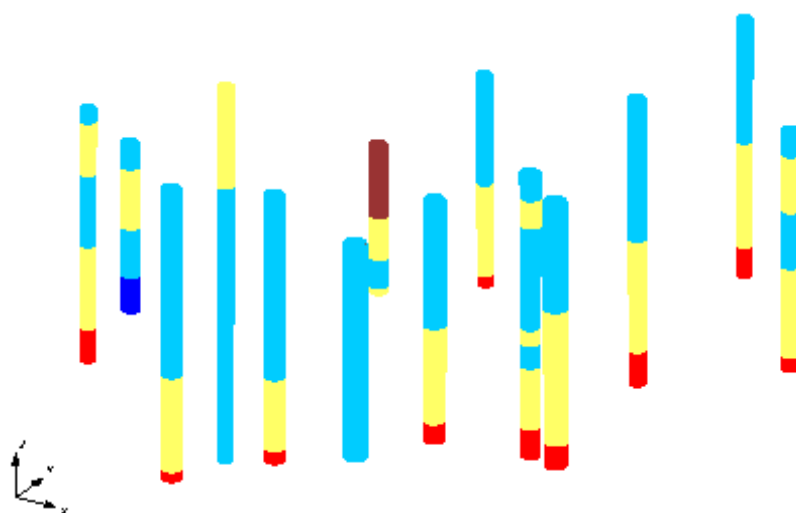
### ۳-۹-۲ Solid Module

مدول جامد<sup>۱</sup> به منظور ایجاد مدل‌های سه بعدی چینه شناسی استفاده می‌شود و با ساخت آن می‌توان از مکان‌های مختلف آن مقطع عرضی تهیه کرد. این مدول به منظور شناسایی بهتر منطقه مورد مطالعه ساخته می‌شود.

### ۳-۹-۳ Borehole Module

مدول گمانه برای نمایش داده‌های گمانه استفاده می‌شود (شکل ۳-۳). اطلاعات گمانه‌ها می‌تواند به صورت یک فایل اکسل یا یک فایل text به نرم افزار وارد شود. گمانه‌ها می‌توانند به همراه رنگ‌ها و عمق زون‌های مختلف، به صورت نمای منحصر سه بعدی نمایش داده شوند.

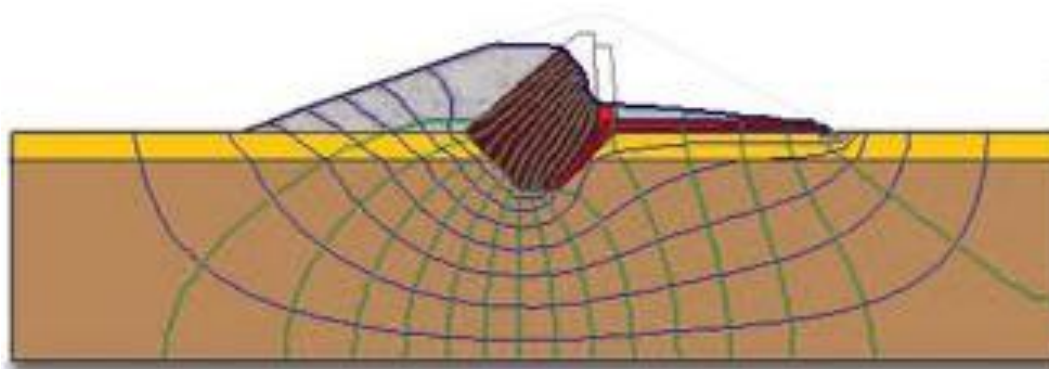
<sup>۱</sup> Solid module



شکل ۳-۳- نمایش چینه بندی خاک در مدول گمانه

### ۲D Mesh Module - ۴-۹-۳

این مدول به منظور ایجاد شبکه دوبعدی عناصر محدود<sup>۱</sup> استفاده می شود که برای تعیین توپوگرافی و مرز مش سه بعدی استفاده می شود. این مدل شامل کد SEEP2D می باشد (شکل ۴-۳).

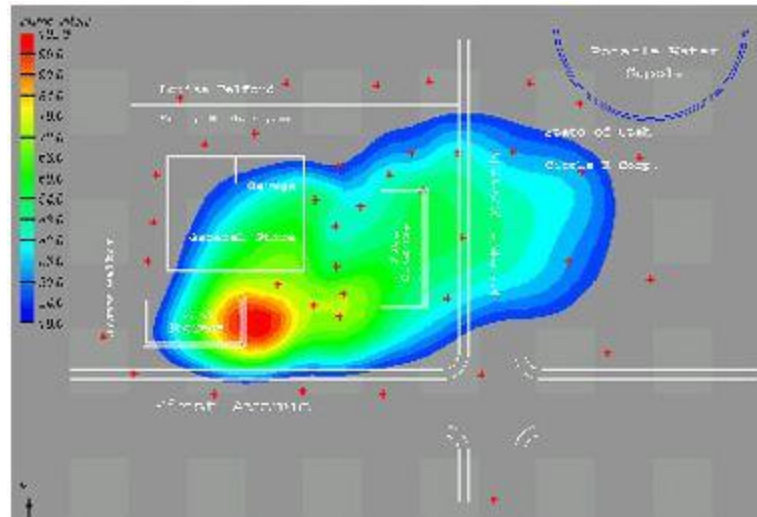


شکل ۴-۳- نمایش شبکه با عناصر محدود دو بعدی

<sup>۱</sup> Finite element

## 2D Grid Module – ۵-۹-۳

مدول شبکه دو بعدی به منظور ایجاد و ویرایش شبکه‌های دو بعدی دکارتی استفاده می‌شود. شبکه دو بعدی اصولاً برای تجسم سطح و ایجاد کنتورها استفاده می‌شود (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵- درون یابی داده های غلظت آلاینده در شبکه تقاضل محدود دوبعدی

## 2D Scatter Point Module – ۶-۹-۳

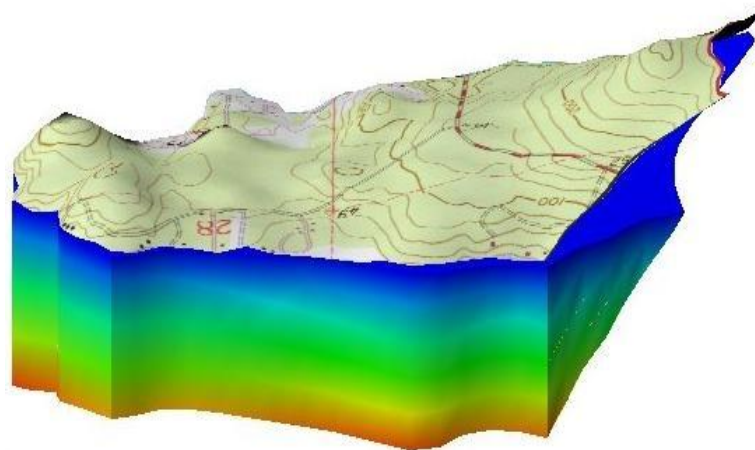
مدول نقاط دو بعدی به منظور درون یابی از گروهی از داده‌های پراکنده برای سایر اهداف مثلاً درون یابی نقاط ارتفاعی مربوط به لایه‌های آبخوان استفاده می‌شود.

## 3D Scatter Point Module – ۷-۹-۳

مدول نقاط سه بعدی به منظور درون یابی گروهی از نقاط پراکنده سه بعدی به سلول‌ها، شبکه یا TIN استفاده می‌شود. این مدول شامل ابزار زمین آمار سه بعدی است. برای مثال یک گروه از نقاط دارای مختصات XYZ که نشان گر موقعیت نقاط و C نشان گر غلظت یک آلاینده از نمونه‌های جمع آوری شده از گمانه‌ها است، می‌توانند به عنوان ورودی وارد نرم افزار شوند.

## 3D Mesh Module - ۸-۹-۳

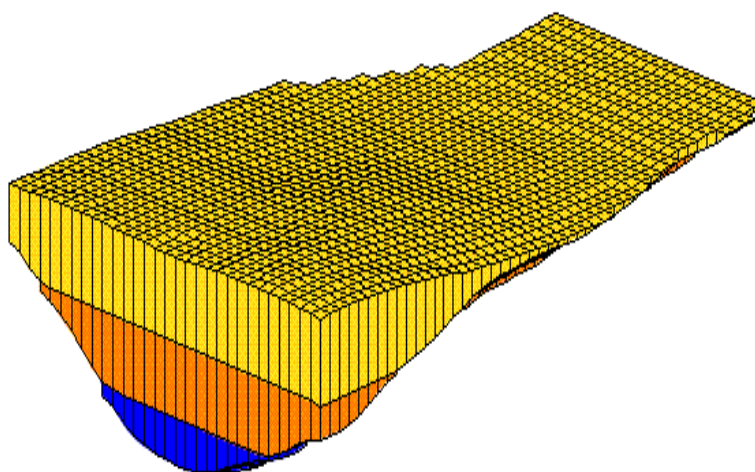
این مدول برای ایجاد و ویرایش سلول‌های سه بعدی عناصر محدود استفاده می‌شود (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶- شبکه سه بعدی عناصر محدود

## 3D Grid Module - ۹-۹-۳

مدول شبکه سه بعدی برای ایجاد شبکه سه بعدی دکارتی استفاده می‌شود (شکل ۳-۷). این شبکه می‌تواند به منظور درون‌یابی، نمایش هم سطوح، سطح مقطع و مدل‌سازی تفاضل محدود استفاده شود.



شکل ۳-۷- شبکه سه بعدی تفاضل محدود

**Map Module – ۱۰-۹-۳**

مدول نقشه ابزار مناسبی جهت استفاده از ابزار ترکیبی<sup>۱</sup> برای ساختن مدل مفهومی فراهم می‌آورد. ابزار ترکیبی برای فراهم کردن برخی از قابلیت‌های GIS در درون GIS ایجاد شده‌اند. چهارچوب شبکه مادفلو در ارتباط با این مدول می‌باشد.

**GIS Module – ۱۱-۹-۳**

مدول GIS امکان ویرایش داده‌های GIS مانند Shape file را می‌دهد. برای استفاده از ابزار کامل این مدول لازم است که نرم افزار ArcGIS بر روی رایانه کاربر نصب باشد.

**GMS ۱۲-۹-۳ – مزایای**

شبیه سازی جریان با کد MODFLOW در GIS از طریق روش شبکه<sup>۲</sup> و روش مدل مفهومی امکان پذیر می‌باشد. در روش شبکه، کاربر به طور مستقیم با شبکه سه بعدی در ارتباط است و پارامترهای مدل از سلولی به سلول دیگر ویرایش می‌شوند.

این روش برای مدل‌هایی که از پیچیدگی کمتری برخوردار هستند، مناسب می‌باشد. در روش مدل<sup>۳</sup> مفهومی از ابزار GIS موجود در مدول MAP، به منظور ایجاد یک مدل مفهومی از منطقه مورد نظر استفاده می‌شود. موقعیت منابع آب شامل چاه، چشمه، قنات، رودخانه و غیره و خواص لایه‌ها نظیر هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال، ضخامت لایه‌ها و مرزهای مدل و سایر اطلاعات مورد نیاز در شبیه‌سازی، در مدل مفهومی تعریف می‌شوند. زمانی که مدل مفهومی کامل شد، شبکه مدل ایجاد می‌شود و کلیه پارامترهای تعریف شده در مدل مفهومی به سلول‌های شبکه نسبت داده می‌شوند و ترتیب چینش اطلاعات از سلولی به سلول دیگر به صورت خودکار انجام می‌شود و دیگر نیازی به وارد

<sup>1</sup> Feature Object

<sup>2</sup> Grid Approach

<sup>3</sup> Conceptual Model Approach

کردن حجم عظیمی از داده‌های ورودی مورد نیاز مدل، از سلولی به سلول دیگر نمی‌باشد. این کار باعث ذخیره شدن وقت بخصوص در مواردی که حجم عظیمی از اطلاعات وجود دارد، می‌شود. از دیگر مزایای GMS، محاسبه خودکار ضریب رسانایی<sup>1</sup> برای سلول‌های در برگیرنده رودخانه است. به طوری که کاربر برای بخش‌های مختلف رودخانه مقدار ضریب رسانایی مربوطه به هر بخش را به صورت متر مربع بر روز بر واحد طول، در Arc مشخص کننده رودخانه در مدل مفهومی تعریف می‌کند و پس از تبدیل مدل مفهومی به مدل شبکه، GMS به صورت خودکار با ضرب کردن طول Arc در هر سلول با مقدار وارد شده ضریب رسانایی بر واحد طول، ضریب رسانایی نهایی برای هر سلول به صورت خودکار محاسبه می‌شود. اطلاعات بیشتر در مورد نرم افزار GMS در سایت مربوطه (<http://www.ems-i.com>) در دسترس می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Conductance

## فصل چهارم: طراحی و اجرای مدل

### ۴-۱- مقدمه

مدل‌های جریان آب زیرزمینی به منظور پیش‌بینی تراز سطح آب، استفاده تفسیری از آن‌ها برای دستیابی به پارامترهای کنترل‌کننده در یک منطقه، دستیابی به شبکه‌ای برای سازماندهی و یکی کردن داده‌های صحرائی و همچنین مطالعه فرآیندهای معمولی موجود در سیستم‌های زمین‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند (قدرتی و ثعبانی، ۱۳۹۱). کارایی یک مدل بستگی به میزان قرابت مطالعات ریاضی با سیستم فیزیکی شبیه‌سازی شده دارد. در این مطالعه هدف، مدیریت بهینه منابع آب شهر مشهد با استفاده از نرم افزار GMS است. این هدف نیازمند بررسی سیستم هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی آبخوان شهر مشهد (وضعیت هندسی آبخوان، هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال، میزان تغذیه از جریان‌های زیرزمینی و بارندگی، تخلیه و زهکشی)، بازبینی و کنترل برخی از داده‌های موجود (مقادیر پمپاژ و موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و چاه‌های مشاهده‌ای) و بررسی صحت آنها قبل از قرار دادن در مدل، کالیبراسیون، واسنجی و در صورت امکان پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان با توجه به سناریوهای مدیریتی مختلف می‌باشد.

### ۴-۲- تهیه مدل مفهومی

پس از تعیین هدف نیاز است تا طرح اصلی مدل ریاضی که مدل مفهومی است و مهمترین گام در تهیه مدل می‌باشد طراحی شود. هدف از تهیه مدل مفهومی ساده کردن شرایط واقعی منطقه مورد مطالعه و سازماندهی داده‌های صحرائی به منظور تجزیه و تحلیل راحت‌تر سیستم است (Anderson and Woessner, 1992). شناخت درست از منطقه و دقیق بودن اطلاعات ورودی منجر به طراحی یک مدل مفهومی خوب و در نتیجه ایجاد یک مدل دقیق می‌شود که به شرایط

واقعی آبخوان نزدیک‌تر است. تعیین مرزهای مدل، تعیین نوع و ویژگی‌های واحدهای هیدرواستراتیگرافی، شناخت ویژگی‌های جریان و تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان از جمله موضوعاتی هستند که در تهیه مدل مفهومی مورد توجه قرار می‌گیرند. از مزایای بسیار مهم رابط GIS استفاده از آن در تهیه مدل جریان آب زیرزمینی به روش مدل مفهومی می‌باشد. در واقع GIS با این روش کلیه اطلاعات مورد نیاز را که در پایگاه اطلاعاتی GIS ذخیره شده است با استفاده از مدول نقشه<sup>۱</sup> برای تهیه مدل مفهومی جمع‌آوری می‌کند و پس از تهیه مدل مفهومی، آن را به آرایه‌های مدل<sup>۲</sup> تبدیل می‌کند. در این مطالعه ابتدا مدل مفهومی آبخوان تهیه و سپس به مدل ریاضی تبدیل شد. اولین مرحله برای تهیه مدل مفهومی آبخوان شهر مشهد وارد کردن نقشه زمین‌شناسی منطقه به محیط GIS و ژئورفرنس کردن آن است که در نرم‌افزار GIS هم امکان‌پذیر است. پس از ژئورفرنس کردن نقشه، محدوده و مرز منطقه ترسیم شد و پارامترهایی که در ساخت مدل مفهومی مؤثر است تعیین و وارد نرم‌افزار GIS گردید.

### ۴-۳- شرایط اولیه

توزیع بار هیدرولیکی در تمام نقاط سیستم در آغاز شبیه‌سازی را شرایط اولیه گویند. شرایط اولیه، همان شرایط مرزی در شروع شبیه‌سازی می‌باشد. اعمال شرایط اولیه جهت حل معادله حاکم در حالت جریان ناپایدار ضروری می‌باشد. معمولاً بار هیدرولیکی اولیه به صورت نقطه‌ای در سطح دشت پراکنده است. برای نسبت دادن این اطلاعات، که در نقاط معدودی از آبخوان در دسترس می‌باشند، به کل محدوده مدل و سپس به سلول‌های شبکه مدل، از توابع درونیایی مختلف موجود در مدل GIS و مدول‌های موجود در آن (2D Grid, 2D Scatter point, ...) استفاده شده است و توسط روش درونیایی کریجینگ به کلیه سلول‌های شبکه تعمیم داده شده است. به منظور تعیین بار اولیه در

---

<sup>1</sup> Map module

<sup>2</sup> Model array



شرایط پایدار از هیدروگراف واحد دشت (شکل ۱-۱۲) استفاده گردید و زمانی که کمترین نوسان آب زیرزمینی در منطقه وجود دارد و به حالت پایدار نزدیک است، انتخاب شد. هیدروگراف واحد با توجه به بازه زمانی ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۹ دشت ترسیم گردید و مهر ۱۳۸۷ به عنوان دوره پایدار انتخاب گردید. داده‌های سطح آب در این ماه با فرمت txt به مدل وارد گردید و با روش کریجینگ، درون‌یابی و به همه سلول‌ها اعمال شد. بار آبی نهایی محاسبه شده توسط مدل در حالت پایدار به عنوان شرایط اولیه حالت ناپایدار فرض می‌گردد. محل و مختصات چاه‌های مشاهده‌ای در جدول (۴-۱) بیان شده است.

جدول ۴-۱- مختصات جغرافیایی چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان شهر مشهد

شماره چاه	نام چاه	utmX	utmY
۱	خواجه اباصلت	۷۳۹۸۶۷	۴۰۰۸۴۹۷
۲	بلوار جنگل	۷۳۴۵۳۷	۴۰۱۴۳۱۸
۳	دستگران	۷۴۷۱۶۹	۴۰۱۵۱۷۳
۴	قلعه ساختمان	۷۴۱۳۶۷	۴۰۱۵۷۰۴
۵	بلوار تلویزیون	۷۲۹۷۶۲	۴۰۱۹۱۸۳
۶	بلوار راه آهن	۷۳۴۷۳۵	۴۰۲۱۶۴۱
۷	پارک ملت	۷۲۷۰۷۴	۴۰۲۲۱۸۳
۸	التیمور	۷۴۲۹۹۸	۴۰۲۲۱۹۶
۹	بلوار فردوسی	۷۳۰۰۲۴	۴۰۲۳۰۵۴
۱۰	انبار سیس آباد	۷۳۷۹۲۱	۴۰۲۵۸۸۹
۱۱	قاسم آباد	۷۲۲۴۹۷	۴۰۲۶۴۴۹
۱۲	اراضی قاسم آباد	۷۲۶۰۱۵	۴۰۲۷۴۱۰
۱۳	خین عرب	۷۳۳۶۵۸	۴۰۲۸۷۱۴
۱۴	قهقهه	۷۲۸۴۱۹	۴۰۳۳۲۵۶
۱۵	امرقان فردوسی	۷۳۰۸۷۸	۴۰۳۵۰۲۴
۱۶	کلا ته برفی	۷۲۱۳۷۰	۴۰۳۵۹۵۶
۱۷	مسگران	۷۲۷۲۷۲	۴۰۳۸۹۳۰

## ۴-۴- تبیین شرایط مرزی مدل

یکی از بخش‌های مهم در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی شناخت ناحیه مدل و مرزهای آن است. در تعریف ناحیه مدل، کاربر مدل باید ناحیه مورد مطالعه را از سیستم‌های آب زیرزمینی مجاور آن متمایز سازد. در نتیجه مرز مدل، فصل مشترک بین ناحیه مدل و محیط اطراف آن می‌باشد. در هر حالتی باید شرایط در محل مرزها مشخص گردد. اختصاص بار هیدرولیکی، نرخ جریان و یا ترکیبی از آنها بر روی سلول‌های مرزی، شرایط مرزی را برای ناحیه مدل مشخص می‌نمایند. انتخاب صحیح شرایط مرزی یکی از حساس‌ترین مراحل در طراحی مدل است. مرزها به دو گروه قابل تقسیم هستند، یکی مرزهای فیزیکی که قابل رویت بوده و بطور دائم بر الگوی جریان مؤثر می‌باشند و دیگری مرزهای هیدرولیکی که با داشتن شرایطی خاص در تغذیه یا تخلیه آبخوان نقش دارند. مرزهای فیزیکی سیستم جریان آب زیرزمینی به وسیله وجود فیزیکی یک سنگ نفوذناپذیر یا توده بزرگی از آب سطحی تشکیل می‌شوند. دیگر مرزها، از قبیل خط تقسیم آب زیرزمینی و خطوط جریان، که نامرئی بوده و در نتیجه شرایط هیدرولوژیکی تشکیل می‌گردند، مرزهای هیدرولیکی نامیده می‌شوند (Anderson & Woessner, 1992). مرزهای هیدرولیکی با تغییر شرایط هیدرولوژیکی ممکن است جابجا شوند یا از بین بروند. مرزهای هیدرولیکی در واقع مرزهای مصنوعی هستند که توسط طراح مدل ایجاد می‌گردند. مرزهای هیدرولیکی شامل انواع زیر می‌باشد:

- مرز با بار هیدرولیکی معین<sup>۱</sup> (نوع اول)

- مرز با جریان معین یا نفوذناپذیر<sup>۲</sup> (نوع دوم)

- مرز با بار هیدرولیکی وابسته به جریان<sup>۳</sup> (نوع سوم)

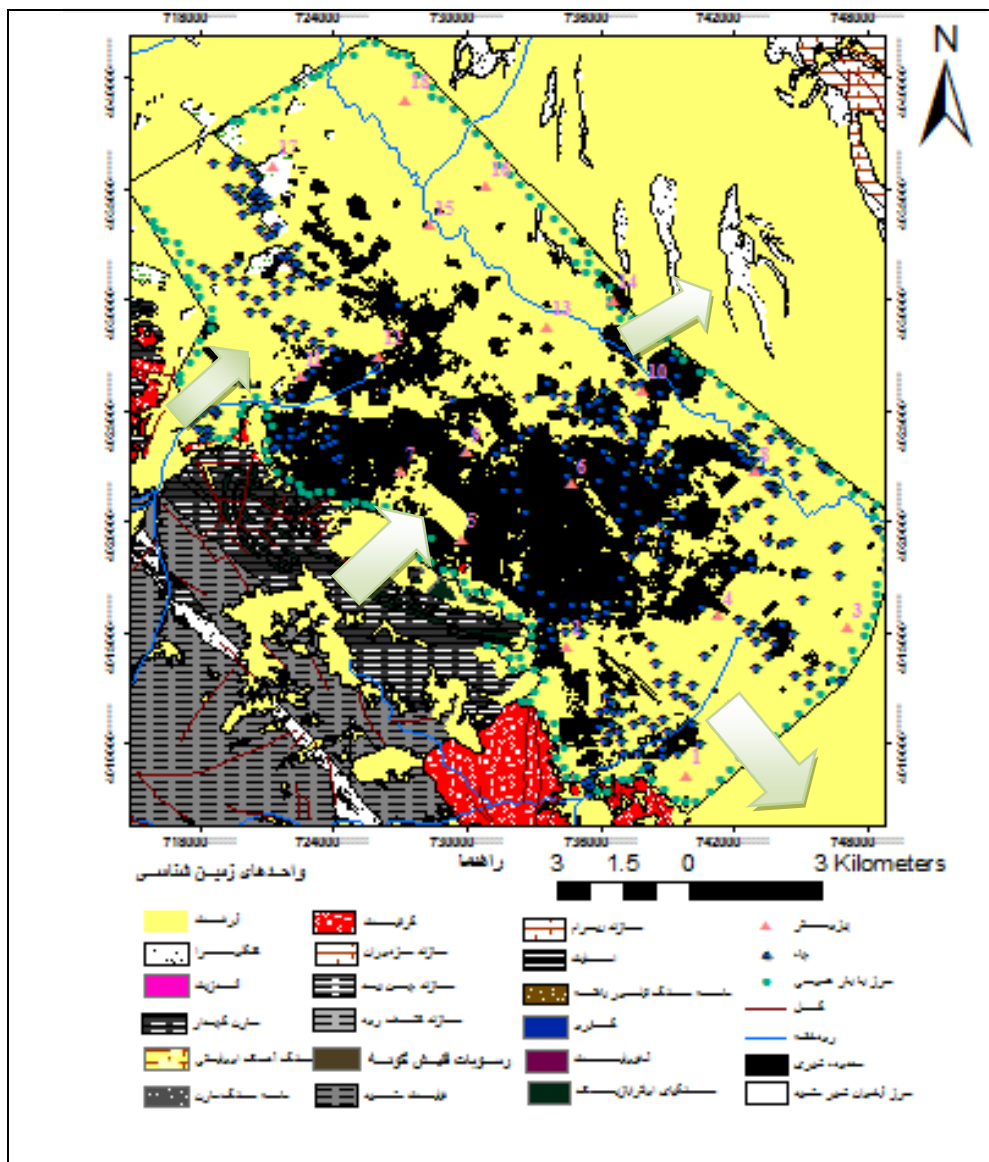
برای ترسیم مرزهای آبخوان شهر مشهد از نقشه سطح آب و نقشه توپوگرافی استفاده شد. برای این کار با توجه به داده‌های سطح ایستابی، چاه‌های پیژومتریک منطقه و رسم خطوط هم‌پتانسیل نقاط

<sup>1</sup> Drichlet

<sup>2</sup> Neuman

<sup>3</sup> Cauchy

خروجی و ورودی جریان آب زیرزمینی مشخص گردید. طبق نقشه هم‌پتانسیل (شکل ۱-۱) جهت جریان آب زیرزمینی از سمت شمال غرب به سمت جنوب شرق می‌باشد. بر این اساس قسمت‌های شرقی و جنوبی محدوده مطالعاتی به عنوان خروجی آبخوان و قسمت‌های شمال غربی و غرب دشت به عنوان ورودی آبخوان در نظر گرفته شده است (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۴ - محدوده مطالعاتی آبخوان شهر مشهد

## ۴-۵- انتخاب معادله جریان و کد کامپیوتری مناسب

آبخوان شهر مشهد از نوع آبخوان آزاد است. تغذیه جانبی دشت از مرزها و تغذیه از بارندگی و چاه‌های فاضلاب مهم‌ترین ورودی‌های آبخوان و برداشت از چاه‌ها مهم‌ترین خروجی آبخوان شهر مشهد می‌باشند. فرم کلی معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی عبارتست از:

رابطه (۴-۱)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm w$$

که  $k_x$  و  $k_y$  و  $k_z$  مؤلفه‌های تنسور هدایت هیدرولیکی،  $S_s$  ظرفیت ویژه و  $w$  مؤلفه تغذیه یا تخلیه‌کننده (به ترتیب با علامت مثبت یا منفی) آبخوان می‌باشند.  $T_x = k_x h$  و  $T_y = k_y h$  و  $T_z = k_z h$  (ضریب آگذری و ضخامت بخش اشباع) است. از این رو معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی که به معادله غیرخطی بوزینسک<sup>۱</sup> معروف است به صورت معادله زیر در می‌آید:

رابطه (۴-۲)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm w$$

معادله دیفرانسیل با اعمال شرایط اولیه و مرزی حل می‌گردد و نیاز به فرضیات زیادی دارد و پیچیدگی‌های موجود در محدوده مطالعاتی نیز حل آن را بسیار دشوار می‌نماید. از راه‌های حل معادله روش‌های عددی می‌باشند که در کدهای نرم‌افزاری مختلفی استفاده گردیده‌اند. برای انتخاب کد مناسب برای تهیه مدل ریاضی جریان آب زیرزمینی معیارهای مهمی را باید در نظر داشت که از جمله آنها می‌توان به معیارهای زیر اشاره کرد:

- کد مورد استفاده باید کارایی مناسب، عمومیت استفاده و سهولت کاربرد داشته باشد.

- صحت و دقت جواب‌های حاصل از آن باید تایید شده باشد (با مقایسه جواب‌های آن با روش‌های تحلیلی یا مدل‌های معتبر دیگر).

<sup>1</sup> Non Linear Bousineq Equation

- کد مورد نظر در دسترس بوده و قابل استفاده با سخت‌افزارهای موجود باشد.  
با توجه به نکات یادآوری شده، برای تهیه مدل جریان آب زیرزمینی شهر مشهد از نرم‌افزار GMS 7.1 استفاده گردید که از کد MODFLOW برای تهیه مدل استفاده می‌کند و کلیه معیارهای فوق را دارا می‌باشد.

### ۴-۶- طراحی و تهیه مدل مفهومی

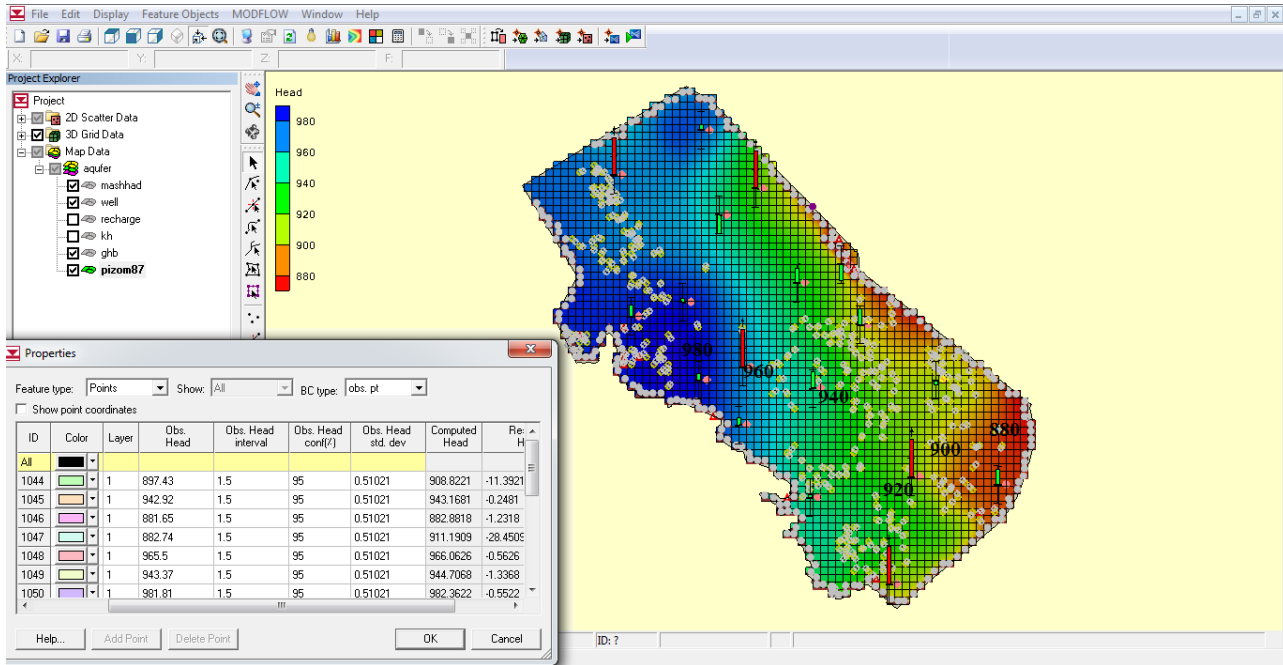
در این مرحله کلیه داده‌های مدل و پارامترهای مدل به نرم‌افزار مدل‌سازی وارد گردید مدل مفهومی تهیه شده برای منطقه مطالعاتی از چند لایه (Coverage) تشکیل شده است.

### ۴-۶-۱- لایه اطلاعاتی آبخوان

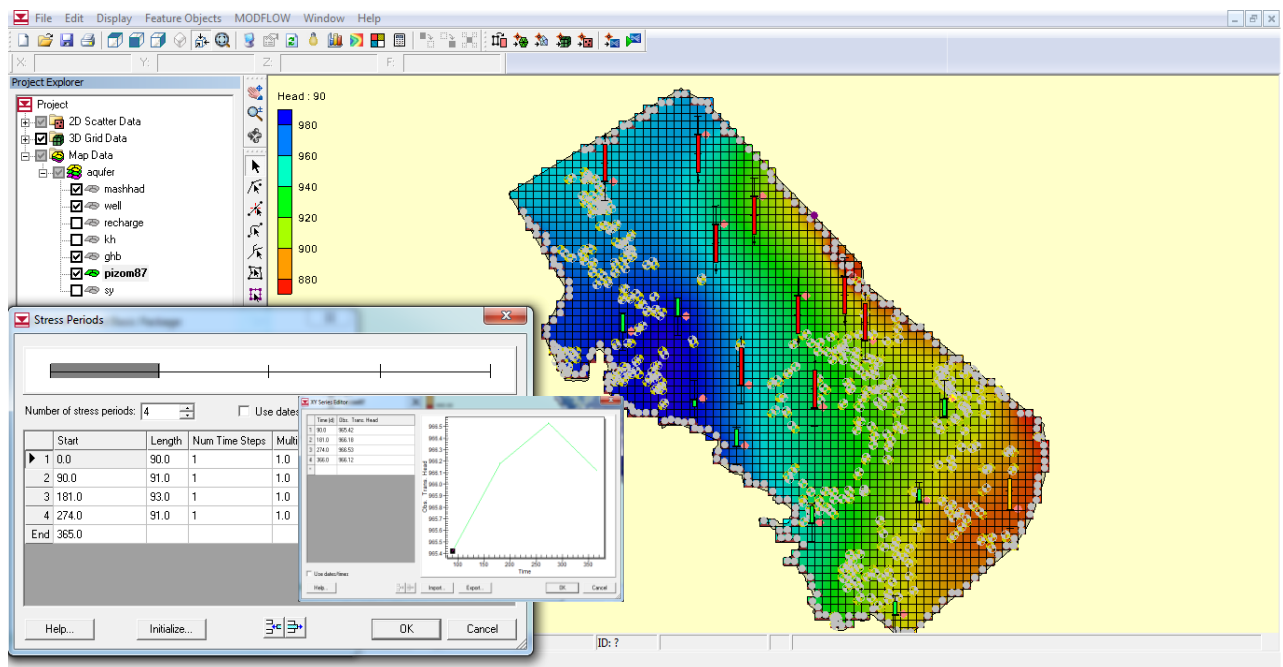
اولین لایه اطلاعاتی شامل تعیین محدوده مطالعاتی است این محدوده شامل محدوده‌ی اطراف چاه‌های بهره‌برداری و پیزومترها می‌باشد که در نرم‌افزار GIS با استفاده از نقشه توپوگرافی و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه تهیه و در قالب یک فایل با پسوند Shp (Shape file) وارد نرم‌افزار GMS گردید (شکل ۴-۱).

### ۴-۶-۲- لایه اطلاعاتی پیزومتر

این لایه با استفاده از داده‌های ۱۷ حلقه چاه مشاهده‌ای و با نام PIZOM در نرم‌افزار معرفی شد. برای این لایه از داده‌های پیزومتری مهر ۱۳۸۷ برای حالت پایدار و از داده‌های پیزومتری آبان ۱۳۸۷ تا مهر ۱۳۸۸ برای حالت ناپایدار استفاده شد. این داده‌ها بعد از انجام دادن یک سری محاسبات در نرم‌افزار Excel با فرمت txt وارد نرم‌افزار GMS شد. تفاوت حالت پایدار و ناپایدار در نحوه ورود داده‌ها است. شکل (۴-۲) لایه اطلاعاتی پیزومتر در حالت پایدار و شکل (۴-۳) لایه اطلاعاتی پیزومتر در حالت ناپایدار را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲- لایه اطلاعاتی پیزومتر در حالت پایدار



شکل ۴-۳- لایه اطلاعاتی پیزومتر در حالت ناپایدار

## ۴-۶-۳- لایه اطلاعاتی چاه بهره‌برداری

استخراج آب زیرزمینی از طریق چاه‌های پمپاژ به صورت جریان‌های مشخص از آبخوان از طریق بسته نرم‌افزاری چاه<sup>۱</sup> شبیه‌سازی شده است برای استفاده از این بسته ابتدا محل و دبی چاه مشخص می‌شود. علامت منفی معرف برداشت از آبخوان و علامت مثبت معرف تغذیه می‌باشد. لایه اطلاعاتی چاه با استفاده از داده‌های ۳۱۰ حلقه چاه بهره‌برداری به مدل وارد شد. این داده‌های اولیه داده‌هایی خام و به صورت تخلیه سالیانه است از آنجا که واحد انتخابی برای استفاده از این داده‌ها در نرم‌افزار GMS به صورت روزانه تعیین شده است پس باید این داده‌ها را به صورت تخلیه خالص و به صورت روزانه محاسبه کرد. برای به دست آوردن تخلیه خالص چاه‌های بهره‌برداری، ابتدا با در نظر گرفتن ساعت کارکرد چاه‌های بهره‌برداری، ضرایبی برای هر ماه در نظر گرفته شد (جدول ۴-۲).

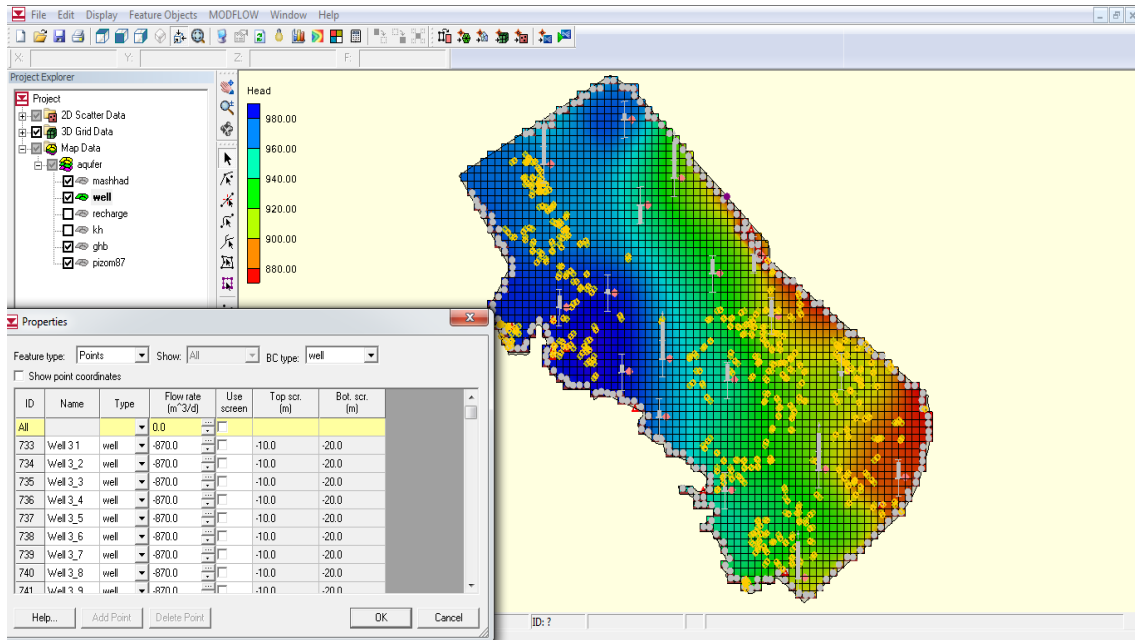
جدول ۴-۲- درصد ضرایب ماهانه تخلیه هر چاه (آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی)

فروردین	ردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	سفند
۸	۱۳	۱۶	۱۷	۱۷	۱۲	۸	۴	۲	۱	۱	۱

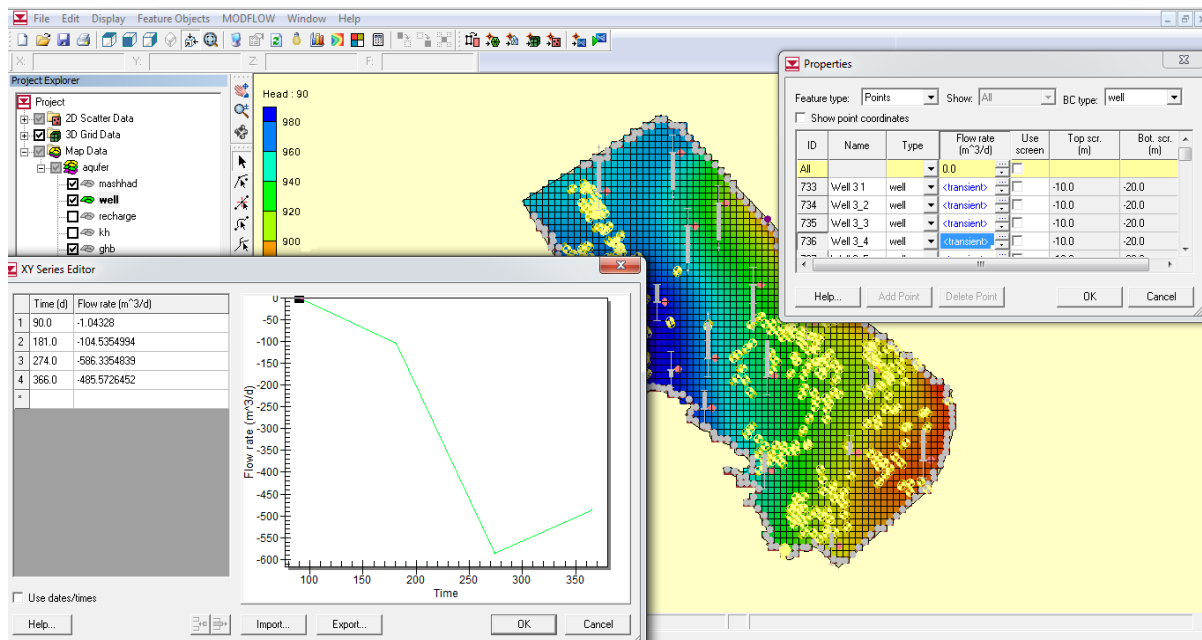
با ضرب تخلیه سالیانه هر چاه بهره‌برداری در ضریب هر ماه تخلیه ناخالص به صورت ماهانه به دست می‌آید. چون تخلیه خالص (تخلیه انجام شده با کسر مقدار آب برگشتی) مد نظر است با کسر آب برگشتی آبیاری از میزان تخلیه ماهانه، تخلیه خالص به دست می‌آید. میزان آب برگشتی از آبیاری با در نظر گرفتن سطح زیر کشت و نوع فعالیت کشاورزی و با توجه به گزارش اداره آب منطقه‌ای ۲۵ درصد در نظر گرفته شد. با کسر این مقدار از تخلیه ماهانه هر چاه میزان تخلیه خالص به صورت ماهانه، و با تقسیم تخلیه خالص ماهانه بر تعداد روز در هر ماه، به صورت روزانه به دست می‌آید. این داده‌ها در نرم افزار Excel و با فرمت txt وارد نرم‌افزار GMS شد. برای حالت پایدار از داده‌های تخلیه مهرماه استفاده شد و در حالت ناپایدار چون دوره‌ها به صورت فصلی در نظر گرفته شده است،

<sup>۱</sup> Well package

از میانگین داده‌های هر دوره به صورت روزانه استفاده گردید ((شکل ۴-۴) و (شکل ۴-۵)).



شکل ۴-۴- لایه اطلاعاتی چاه‌های بهره‌برداری در حالت پایدار

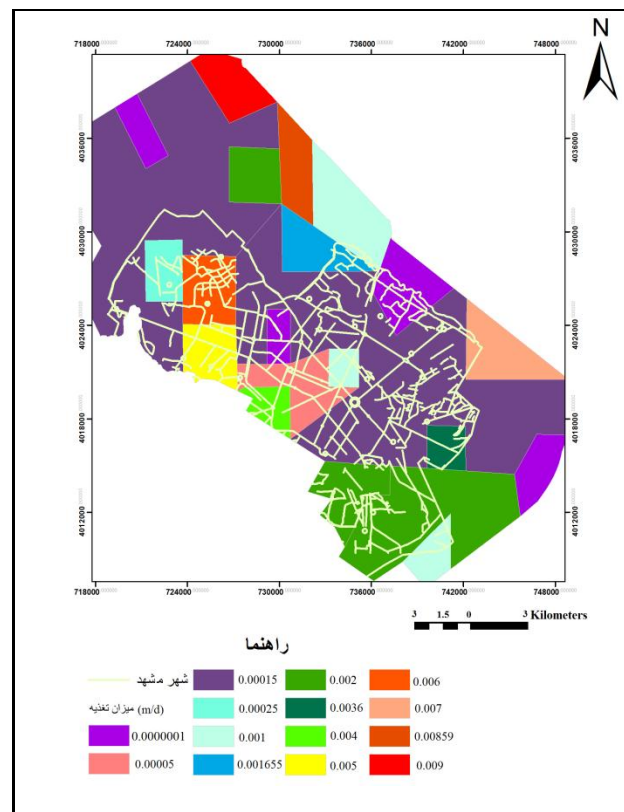


شکل ۴-۵- لایه اطلاعاتی چاه‌های بهره‌برداری در حالت ناپایدار



## ۴-۶-۴- لایه اطلاعاتی تغذیه

برای مشخص کردن تغذیه نواحی گوناگون منطقه مدل، از بسته تغذیه<sup>۱</sup> استفاده گردید. به دلیل ویژگی‌های متفاوت خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، شدت بارندگی و شیب زمین میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی در نقاط مختلف، متفاوت می‌گردد. منابع تغذیه در آبخوان شهر مشهد، بارندگی، فاضلاب شهری، آب بازگشتی از کشاورزی و رودخانه می‌باشد. منطقه مورد مطالعه از لحاظ تغذیه به ۲۲ زون تقسیم شده است (شکل ۴-۶). مقدار بارندگی بر اساس داده‌های هواشناسی برای ماه‌هایی که بارندگی وجود داشت به صورت فصلی مشخص شد سپس بر اساس نقشه خاک منطقه مقدار نفوذ ناشی از بارندگی تعیین گردید. منطقه با بافت خاک درشت ۰/۲، بافت خاک متوسط ۰/۱ و بافت خاک ریز ۰/۰۵ از مقدار بارندگی را دریافت می‌کند.



شکل ۴-۶- منطقه‌بندی تغذیه ورودی به مدل

<sup>1</sup> Recharge Package

برای برآورد نفوذ ناشی از فاضلاب به آب زیرزمینی نیز بر اساس ضریب ارائه شده توسط سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی اقدام گردید. بر این اساس ۷۲ درصد آب شرب مصرفی در منطقه به فاضلاب تبدیل می‌شود (سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۰). حجم آب مصرفی در مراحل ساخت مدل (در مرحله پایدار، ناپایدار و صحت سنجی) بر مساحت محدوده مدل‌سازی و تعداد روزهای همان سال تقسیم شد سپس با درصد نفوذ آب حاصل از بارندگی جمع نموده و به صورت متر بر روز در هر مرحله به مدل وارد گردید.

### ۴-۶-۵- لایه اطلاعاتی تبخیر

هنگامی که سطح ایستابی در نزدیکی سطح زمین قرار داشته باشد با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و اختلاف ارتفاع سطح ایستابی با سطح زمین امکان تبخیر از سطح ایستابی آب زیرزمینی وجود دارد. MODFLOW تبخیر از سطح ایستابی را به وسیله بسته نرم‌افزاری تبخیر و تعرق<sup>۱</sup> شبیه‌سازی می‌کند. در این بسته برای تعریف تبخیر از سطح ایستابی نیاز به تعیین سه پارامتر حداکثر عمق تبخیر، مقدار میانگین تبخیر روزانه در ماه‌هایی که سطح ایستابی در نزدیکی سطح زمین است و سطحی که از آن تبخیر صورت می‌گیرد (سطح زمین)، است. در این بسته نرم‌افزاری در مواقعی که سطح ایستابی بالاتر یا هم سطح با سطح تعریف شده توسط کاربر (سطح تبخیر و تعرق) باشد تلفات ناشی از تبخیر و تعرق توسط مدل محاسبه می‌شود. اگر سطح ایستابی نسبت به سطح تبخیر و تعرق از حد معینی به نام (عمق توقف)<sup>۲</sup> پایین‌تر باشد، تبخیر و تعرق از سطح ایستابی متوقف خواهد شد. حداکثر عمق تاثیر تبخیر ۵ متر می‌باشد. با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی حتی قبل از اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب پایین‌تر از حدی است که تبخیر بر آن تاثیرگذار باشد، پس این پارامتر در محاسبات بیلان و مدل‌سازی صفر در نظر گرفته می‌شود.

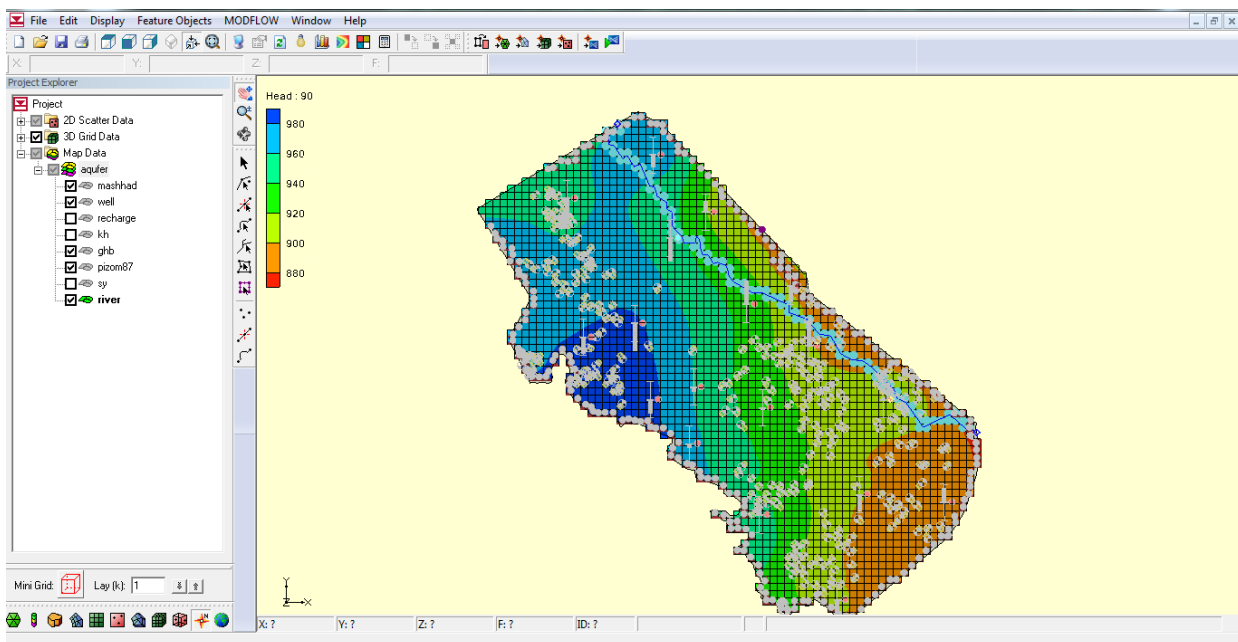
---

<sup>1</sup> Evapotranspiration package

<sup>2</sup> Extinction depth

## ۴-۶-۶- لایه اطلاعاتی رودخانه

رودخانه کشف رود تنها رودخانه اصلی این منطقه است که به صورت فصلی باعث تغذیه آبخوان می شود. برای اعمال رودخانه در مدل سازی از بسته RIVER استفاده می شود. برای وارد کردن رودخانه به محیط مدل بعد از بررسی مسیر رودخانه در محیط GIS، رودخانه به صورت POLYLINE و با فرمت SHP وارد نرم افزار GMS گردید (شکل ۴-۷).

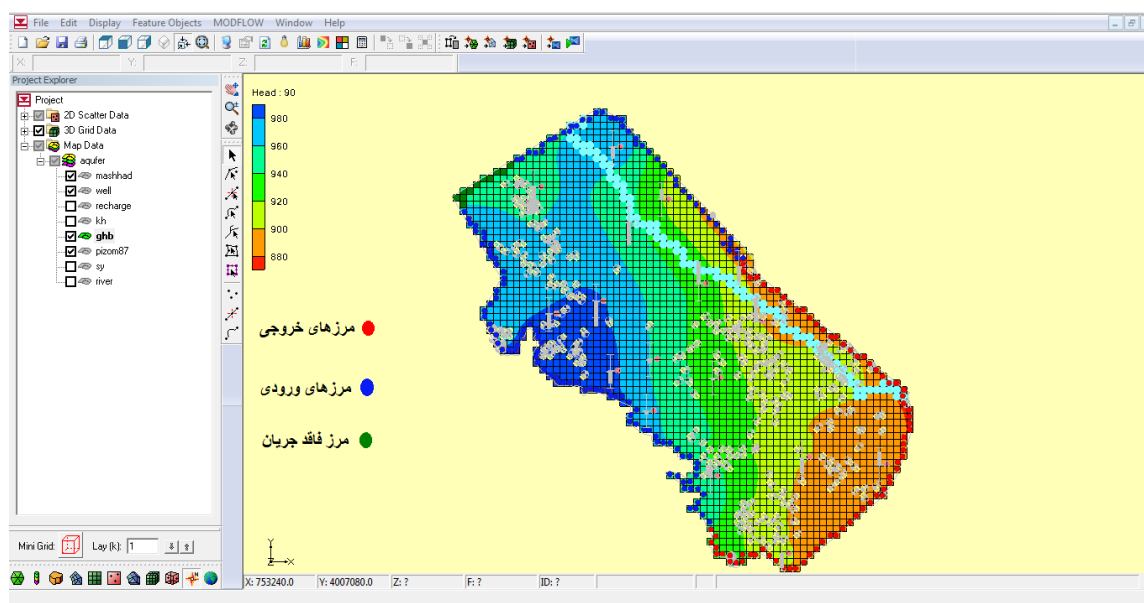


شکل ۴-۷ لایه اطلاعاتی رودخانه

## ۴-۶-۷- مشخص نمودن مرزها و خصوصیات هیدروژئولوژیکی آنها

ابعاد شبکه مدل باید به گونه ای باشد که کلیه منطقه مورد مطالعه را اعم از مرزها پوشش دهد. وارد کردن مرزها از پایگاه اطلاعاتی با استفاده از GMS به راحتی انجام می پذیرد و پس از تهیه مدل مفهومی با مشخص کردن خصوصیات هیدروژئولوژیکی آنها نظیر چگونگی تغییر خطوط تراز پیزومترها و ... به شبکه مدل نسبت داده می شوند. تعیین دقیق حدود شرایط مرزی و انتخاب هر یک از آنها از مراحل مهم تهیه مدل آب زیرزمینی می باشد. شرایط مرزی در واقع بیان ریاضی است که به صورت

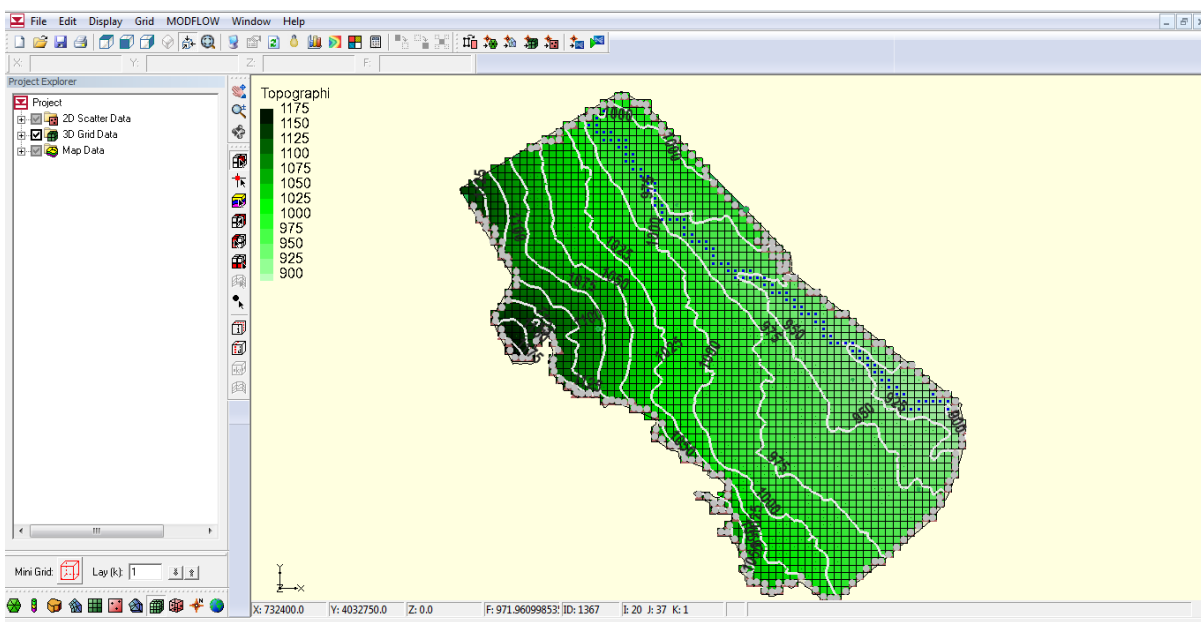
متغیر وابسته (بار هیدرولیکی) و مشتق متغیر وابسته (جریان) به مرزهای محدوده مدل نسبت داده می‌شود. با توجه به شرایط زمین شناسی منطقه و ترسیم خطوط تراز پیزومترها در ماه‌های مختلف جهت جریان موجود، مرزهای خروجی و ورودی به محدوده مطالعاتی تعیین گردید (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸- لایه اطلاعاتی مرز با بار عمومی

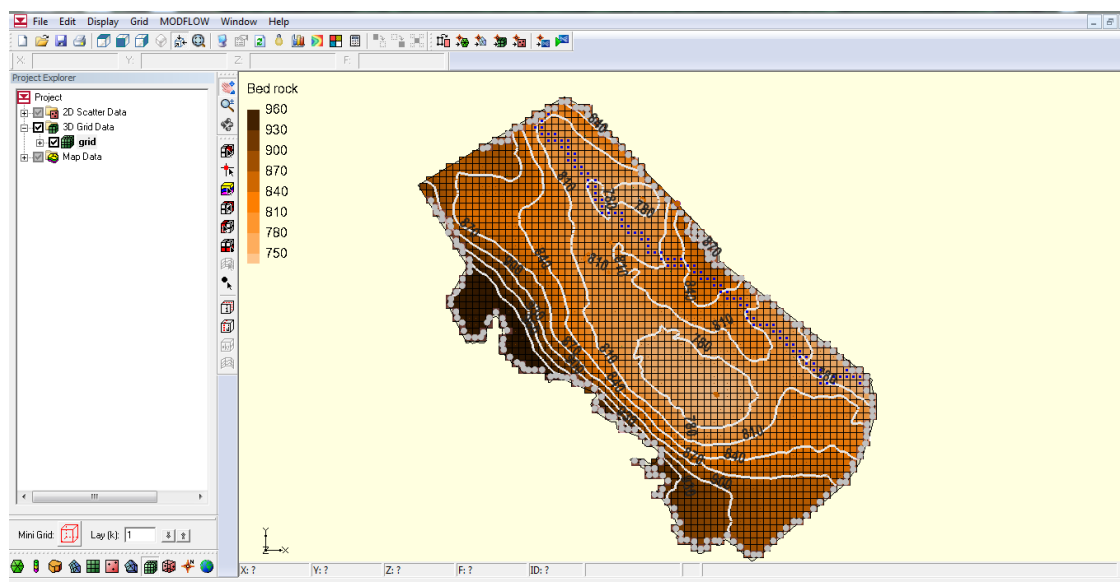
جهت جریان آب زیرزمینی از سمت شمال غرب به سمت جنوب شرق است. بر این اساس قسمت‌های شرقی و جنوبی محدوده مطالعاتی به عنوان خروجی آبخوان و قسمت‌های شمالی و غرب دشت به عنوان ورودی آبخوان می‌باشد. مرز فاقد جریان نیز در قسمتی از شمال غرب محدوده مدل‌سازی که تغذیه صورت نمی‌گیرد (موازی با خطوط جریان) در نظر گرفته شد. جهت اعمال ورودی به آبخوان از حاشیه‌های شمالی و غربی، از مرز با بار هیدرولیکی عمومی (General Head Boundary) استفاده شده است. علت استفاده از مرز نوع GHB این است که برخلاف مرز با بار مشخص، سطح آب در این نوع مرز ثابت نمی‌باشد و ممکن است با رسیدن اثر استرس‌های داخلی به مرز، سطح آب تغییر نماید. دبی جریان ورودی یا خروجی با توجه به گرادیان هیدرولیکی در مرز و گذردهی سلول مرزی تغییر می‌نماید. از طرف دیگر حساسیت بارهای هیدرولیکی محاسباتی مدل به پارامتر مرزی نوع GHB

کمتر از سایر مرزها است. بنابراین اگر فرضیات مرزی به کار رفته در مرز درست نباشد و یا در اثر رسیدن استرس‌ها، مرزها رفتار غیر واقعی نشان دهند، نتایج مدل کمتر تحت تأثیر قرار خواهد گرفت (صدقی و چیت‌سازان، ۱۳۸۳). برای ترسیم مرز فوقانی از نقشه توپوگرافی و DEM استفاده گردید. اطلاعات رقومی توپوگرافی سطح زمین از نقشه DEM استخراج و به صورت فایل txt وارد نرم‌افزار مدل‌سازی گردید. در نرم‌افزار GMS با استفاده از روش Inverse Distance Weighted درون‌یابی صورت گرفته و ارتفاع کلیه سلول‌ها مشخص شده و مرز فوقانی مدل تهیه گردید (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹- تراز لایه فوقانی محدوده مورد مطالعه

برای تهیه مرز تحتانی با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک و لاگ‌های حفاری نقشه منحنی تراز سنگ کف ترسیم گردید. بعد از ترسیم نقشه، در محیط Arc View به لایه رستری، و با استفاده از ابزارهای Arc View به نقاط ارتفاعی تبدیل شد. این داده‌ها با فرمت txt وارد نرم‌افزار GMS شد و با استفاده از مدول 2D Scatter Point و روش IDW درون‌یابی و به کلیه سلول‌ها تعمیم داده شد (شکل ۴-۱۰).



شکل ۴-۱۰- تراز سنگ بستر محدوده مورد مطالعه

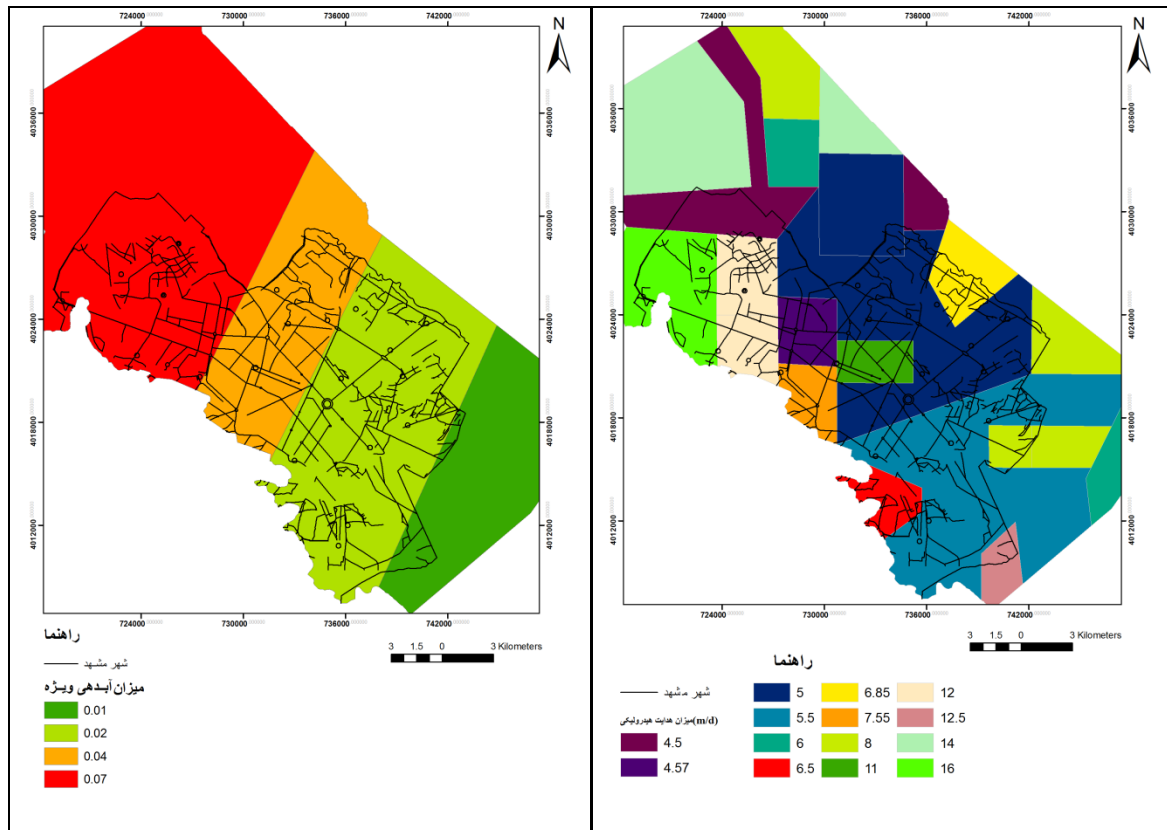
#### ۴-۶-۸- پارامترهای هیدرولیکی آبخوان

یک مدل آب زیرزمینی همواره با عدم قطعیت‌های مختلفی مواجه است. از بارزترین پارامترهای ایجادکننده عدم قطعیت در شبیه‌سازی، داده‌های هیدرولیکی هستند که باید به نحو مطلوبی منطقه‌بندی شوند (Hill and Tiedeman, 2007 ; Poeter and Hill, 1998).

برآوردهای اولیه از پارامترهای هیدرولیکی آبخوان (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه) برای مدل سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی آبخوان شهر مشهد بر اساس داده‌های موجود از آزمایش‌های پمپاژ در منطقه، جنس لایه‌های آبرفتی و بافت خاک منطقه به دست آمد. برای مشخص کردن پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان از روش منطقه‌ای استفاده و بر اساس لاگ‌های حفاری و آزمایش‌های پمپاژ، آبخوان به ۱۹ منطقه تقسیم‌بندی شد. مقادیر اولیه این پارامتر (از ۴/۵ تا ۱۶) بر حسب متر بر روز وارد مدل گردید تا در مرحله واسنجی به وسیله مدل تصحیح شود (شکل ۴-۱۱).

اصطلاح آبدهی ویژه (Specific storage) عبارت است از حجم آب آزاد شده یا ذخیره شده به ازاء واحد حجم سفره که زهکشی می‌شود یا اشباع می‌گردد. مقادیر اولیه این پارامتر که از ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ متغیر است، با استفاده از نتایج آزمایش پمپاژ و بافت خاک به صورت منطقه‌ای وارد مدل گردید تا در

خلال واسنجی اصلاح گردد (شکل ۴-۱۲).



شکل ۴-۱۲ - منطقه بندی اولیه سفره بر اساس

آبدهی ویژه

شکل ۴-۱۱ - منطقه بندی اولیه سفره بر اساس هدایت

هیدرولیکی

## ۴-۷- طراحی و اجرای مدل

گام بعدی در اجرای شبیه سازی جریان، ایجاد یک شبکه و اختصاص پارامترهای مدل به شبکه است.

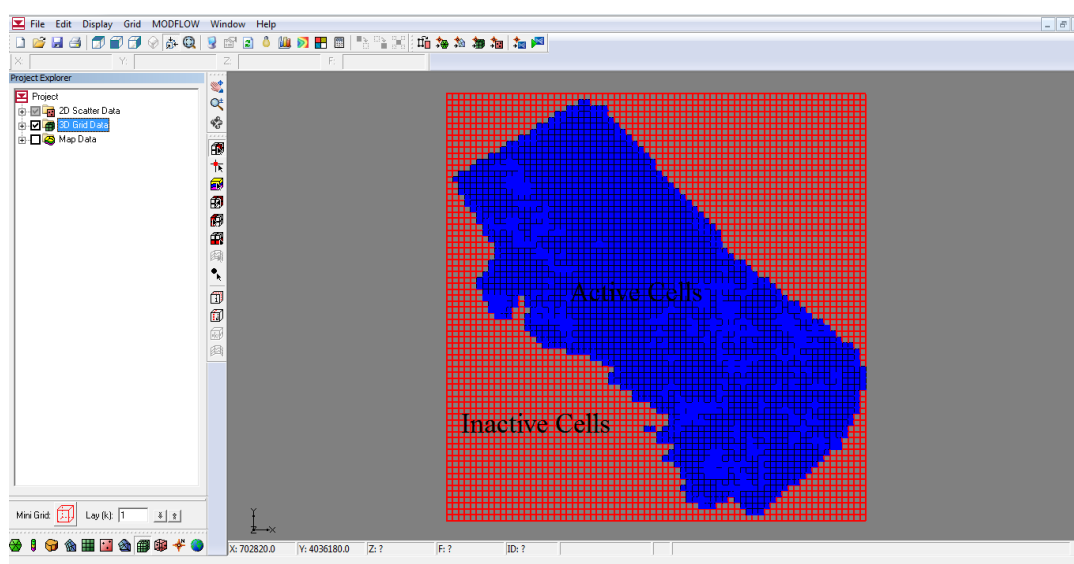
### ۴-۷-۱- تهیه شبکه مدل و گسسته سازی مکانی

پس از تهیه مدل مفهومی می توان شبکه و ابعاد آن را طراحی کرد. در مدل های عددی محدوده پیوسته منطقه مورد مطالعه<sup>۱</sup> با محدوده تفکیک شده<sup>۲</sup> که همان سلول ها هستند، جایگزین می شود. در

<sup>۱</sup> Continuous domain

<sup>۲</sup> Discretized domain

آبخوان شهر مشهد بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی و داده‌های در دسترس و نیز شکل مرزهای آبخوان و وسعت منطقه، محدوده مدل به ۷۰ ستون و ۷۲ ردیف از نوع مرکز شبکه‌ای<sup>۱</sup> با فاصله ردیفی و ستونی یکسان (۵۰۰ متر) که ایجاد ۵۰۴۰ سلول را می‌نماید، شبکه‌بندی گردید. سپس سلول‌های فعال و غیرفعال مشخص شده‌اند. در واقع به اندازه محدوده مطالعاتی، سلول‌های فعال تفکیک شده است (شکل ۴-۱۳).



شکل ۴-۱۳- سلول‌های فعال و غیر فعال در محدوده مطالعاتی

#### ۴-۷-۲- تبدیل مدل مفهومی به مدل عددی

برای نسبت دادن اطلاعات مراحل بالا به سلول‌های شبکه بایستی مدل مفهومی را به مدل عددی تبدیل کرد. به این ترتیب که در مدول map در منوی Feature Objects با انتخاب گزینه زیر Map ← MODFLOW مدل مفهومی ساخته شده در مدول map تبدیل به مدل عددی گردید.

#### ۴-۸- واسنجی مدل کمی

واسنجی عبارت است از فرایند پیدا کردن مجموعه‌ای از شرایط مرزی، تنش‌ها و پارامترهای هیدروژئولوژیک که نتایج به دست آمده از آن به صورت بسیار نزدیکی بر اندازه‌گیری‌های بار

<sup>1</sup> Mesh center



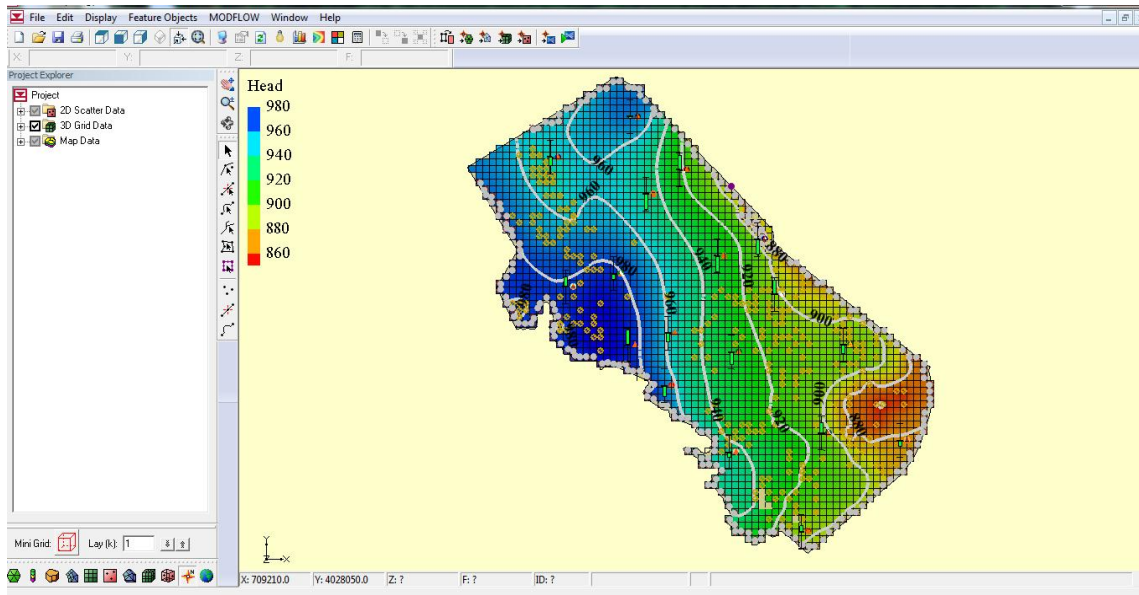
هیدرولیکی و جریان‌های اندازه‌گیری شده صحرایی برآزش دارد (چیت‌سازان و کشکولی، ۱۳۸۱). فرایند واسنجی به دو روش دستی (Trial and Errors) و خودکار (Auto Calibration) امکان پذیر است. در روش دستی ابتدا مدل با اطلاعات اولیه اجرا شده و ارتفاع سطح آب در کلیه گره‌ها و در دوره‌های زمانی محاسبه می‌شود، سپس این ارقام با آمار موجود مقایسه شده و در صورت وجود اختلاف، مقدار عواملی که شناخت آنها تقریبی است در چارچوب حدود مجاز تغییر داده شده و مدل دوباره اجرا می‌گردد. این عمل آنقدر تکرار می‌شود تا نتایج تقریباً مطابق با آمار واقعی منطقه بدست آید. به طور کلی در روش واسنجی دستی هر اجرا و مشاهده نتایج آن، پیامی را در بر دارد که تفسیر این پیام باعث می‌شود هیدروژئولوژیست بیشتر با واقعیت منطقه آشنا گردد. هر چه تعداد اجراها بیشتر باشد ضرایب بدست آمده بیشتر به مدل مفهومی نزدیک می‌گردند و در نتیجه میزان خطاها کمتر می‌شود.

#### ۴-۸-۱- واسنجی مدل در حالت پایدار

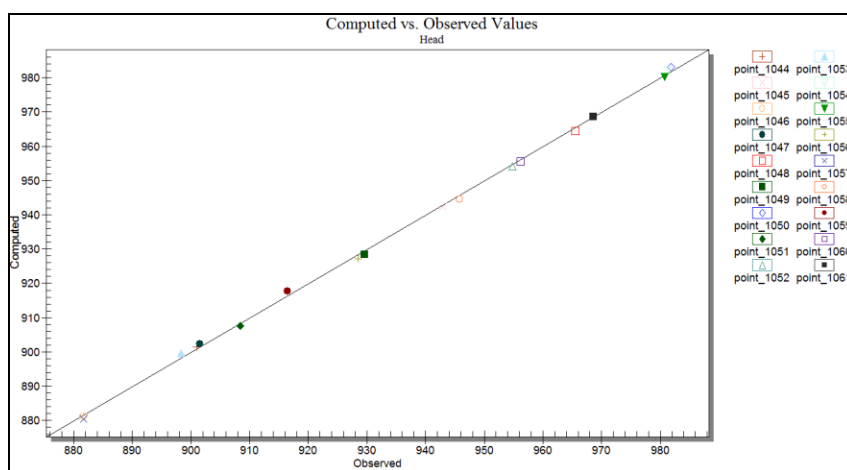
در این پژوهش واسنجی مدل کمی برای یک دوره پایدار یک ماهه (مهر ۱۳۸۷) با استفاده از روش دستی و برای بهینه‌سازی مقدار هدایت هیدرولیکی و میزان تغذیه انجام گرفت. اطلاعات مربوط به سطح آب برای کلیه گره‌ها و پیزومترها محاسبه شد. طی مرحله واسنجی پارامترهایی مثل هدایت هیدرولیکی، پارامتر تغذیه، فاکتور قابلیت هدایت مرزها، جریان خروجی و ورودی و شرایط مرزی با توجه به جهت جریان در طول اجرای متوالی مدل تغییر داده می‌شود تا برآزش مناسبی بین بارهای هیدرولیکی محاسبه شده و مشاهده شده ایجاد گردد و میزان خطا و اختلاف به حد مطلوب و مجاز برسد. خطای قابل قبول و مجاز بسته به هدف مدل‌سازی متفاوت است در این تحقیق میزان خطای قابل قبول (برحسب وسعت منطقه و دقت داده‌ها)  $1/5$  متر می‌باشد. در طول کالیبره کردن و واسنجی میزان خطای RMS مورد نظر است هر چه این خطا به صفر نزدیک‌تر باشد مدل از دقت و صحت بالایی برخوردار خواهد بود (شکل ۴-۱۴). بعد از اتمام واسنجی تمام پیزومترها در محدوده خطای مجاز می‌باشند و تماماً به رنگ سبز مشاهده می‌شوند (شکل ۴-۱۵). مقایسه بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی سطح آب در پیزومترها حاکی از آن است که انطباق مناسبی بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی برقرار است (شکل ۴-۱۶).

Error Summary	
Head	
Mean Error:	-0.215
Mean Abs. Error:	0.902
Root Mean Sq. Error:	0.973

شکل ۴-۱۴ - میانگین خطای آخرین اجرای مدل در حالت پایدار



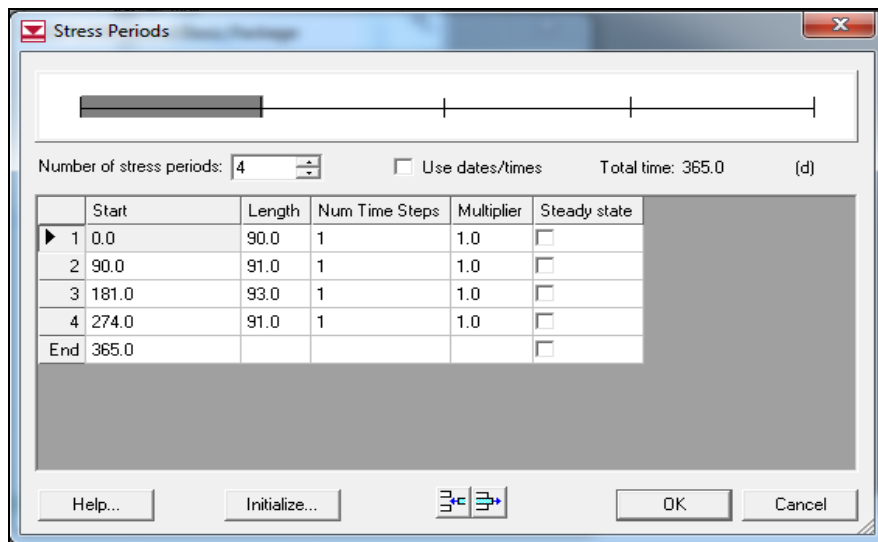
شکل ۴-۱۵ - وضعیت تراز سطح آب زیرزمینی (بر حسب متر) بعد از مرحله واسنجی در شرایط پایدار



شکل ۴-۱۶ - برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای آخرین اجرای مدل در حالت پایدار

## ۴-۸-۲- گسسته سازی زمانی برای حالت ناپایدار

گسسته سازی زمانی مدل به معنی تقسیم نمودن مدت زمان اجرای مدل به دوره های زمانی کوچکتر می باشد. این عمل با در نظر گرفتن داده های هیدروژئولوژیکی در دسترس، تنش های وارده به سیستم، هیدروگراف واحد دشت و هدف از مدل سازی صورت می پذیرد. گسسته سازی زمانی مدل با تعیین دوره های تنش<sup>۱</sup> و گام های زمانی<sup>۲</sup> انجام شده و سپس زمان اجرای مدل به تعدادی استرس پیروود و گام زمانی تقسیم می گردد. تقسیمات استرس پیروود بر اساس استرس های وارد بر آبخوان صورت می گیرد. آبخوان شهر مشهد در یک دوره زمانی یک ساله (آبان ۱۳۸۷ تا مهر ۱۳۸۸) با ۴ دوره تنش فصلی برای حالت ناپایدار شبیه سازی گردید. طول هر یک از دوره های تنش برابر با تعداد روزهای هر فصل است. این چهار دوره در مدل به دوره های تنش معروف می باشند. تقسیمات زمانی انجام شده برای تمام پیروومترها، چاه های بهره برداری، تغذیه و تنش های موجود در دشت اعمال گردید و وارد نرم افزار شد (شکل ۴-۱۷).

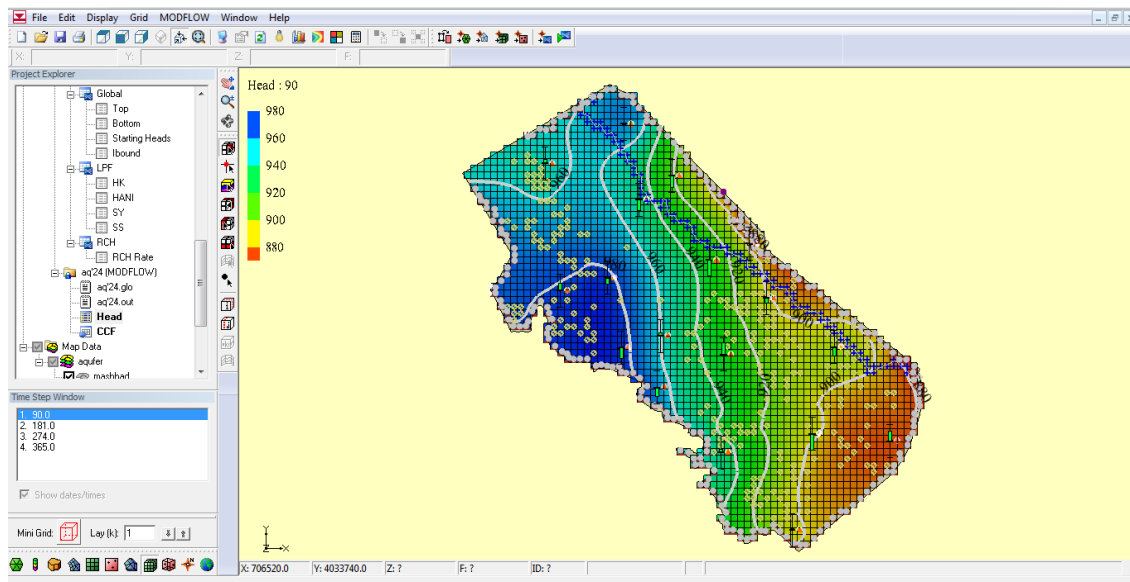


شکل ۴-۱۷- دوره های تنش و گام های زمانی در حالت ناپایدار

<sup>۱</sup> Stress periods<sup>۲</sup> Time steps

## ۴-۸-۳- واسنجی در حالت ناپایدار

پس از کالیبراسیون مدل در شرایط پایدار، مدل برای مدت ۳۶۵ روز در حالت ناپایدار اجرا گردید. برای واسنجی در شرایط ناپایدار، از داده‌های ۱۸ حلقه چاه مشاهده‌ای در محدوده مطالعاتی مربوط به آبان ۱۳۸۷ تا پایان مهر ۱۳۸۸، استفاده و مدل در این بازه زمانی تحت شرایط ناپایدار واسنجی شده است. در شرایط ناپایدار آبدهی ویژه، میزان تغذیه و ... به صورت فصلی به مدل وارد و با توجه به داده‌های موجود و شرایط آبخوان شهر مشهد، تغییر داده شدند. مدل برای حالت ناپایدار اجرا گردید (شکل ۴-۱۸). این پارامترها تا زمانی واسنجی می‌شود که روند هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی در بازه قابل قبول واقع شود و RMS به حداقل ممکن برسد و همه پیرومترها در محدوده خطای مجاز قرار گیرند (شکل ۴-۱۹).

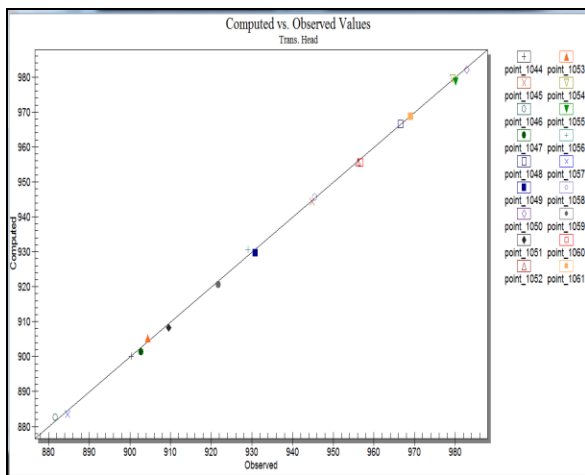


شکل ۴-۱۸- تراز سطح آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی بعد از مرحله واسنجی شرایط ناپایدار دوره اول

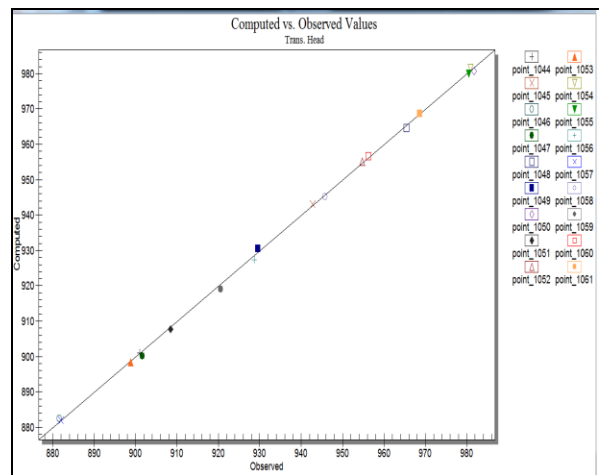
Error Summary	
Trans. Head	
Mean Error:	-0.235
Mean Abs. Error:	0.764
Root Mean Sq. Error:	0.881

شکل ۴-۱۹- میانگین خطای آخرین اجرای مدل در حالت ناپایدار

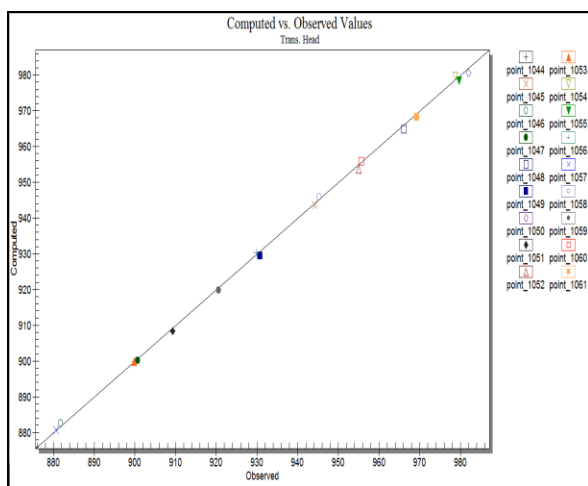
بعد از پایان مرحله واسنجی آبدهی ویژه به ۱۶، مقدار هدایت هیدرولیکی به ۲۲ زون تقسیم گردید. برازش مقادیر محاسباتی و مشاهداتی حاصل از واسنجی برای هر یک از دوره‌های تنش در شکل‌های (۴-۲۰ تا ۴-۲۳) نشان داده شده است. پارامترهای هیدرودینامیکی نهایی حاصل از واسنجی مدل ناپایدار نیز در شکل (۴-۲۴) نشان داده شده است.



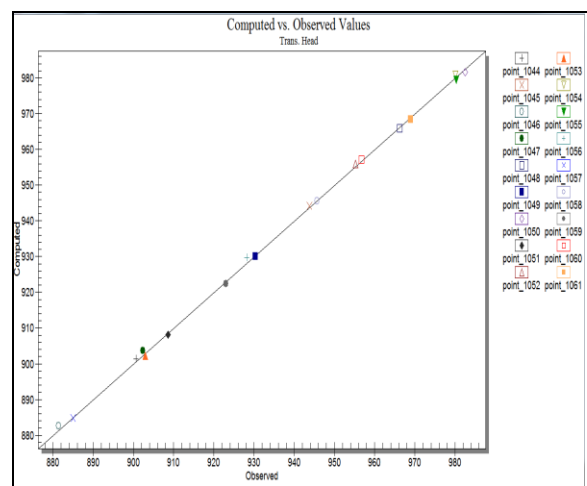
شکل ۴-۲۱- برازش مقادیر بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی دوره دوم



شکل ۴-۲۰- برازش مقادیر بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی دوره اول

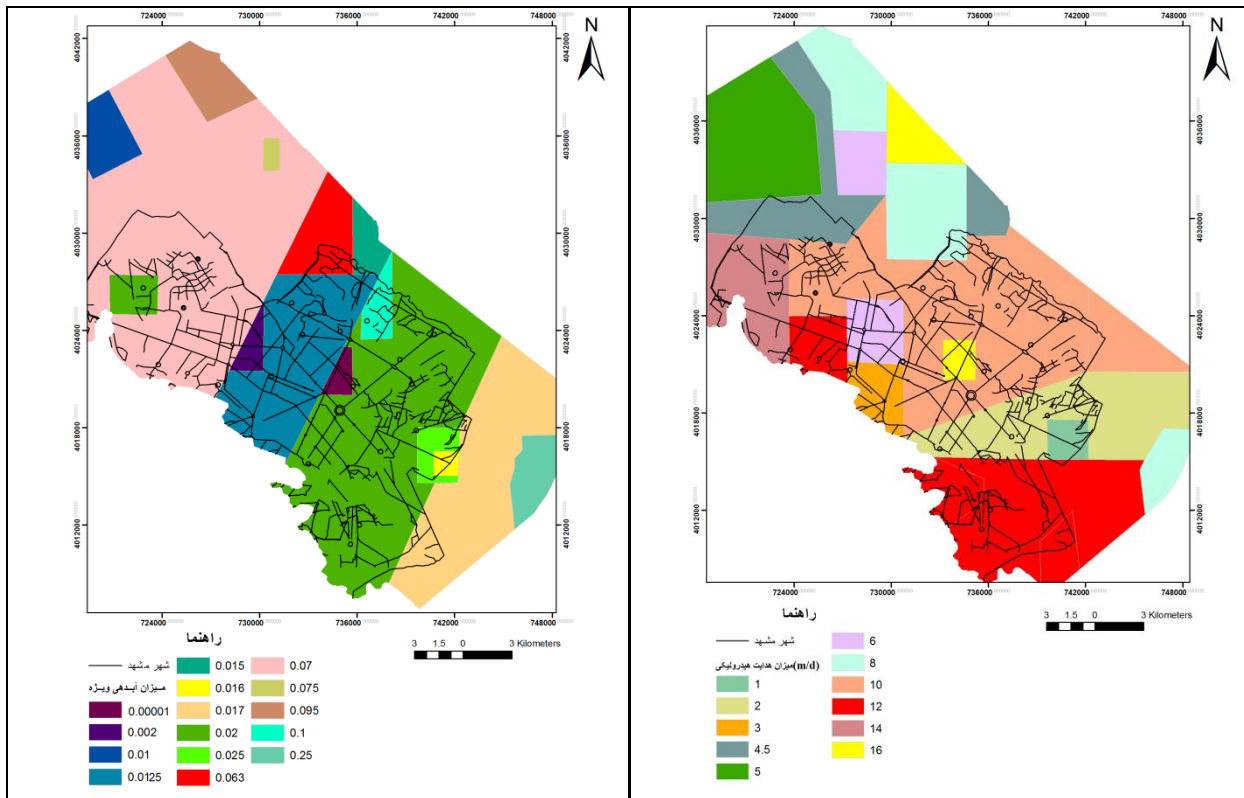


شکل ۴-۲۳- برازش مقادیر بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی دوره چهارم



شکل ۴-۲۲- برازش مقادیر بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی دوره سوم

مقدار هدایت هیدرولیکی بین ۱ تا ۱۶ متر بر روز و آبدهی ویژه بین ۰/۰۰۰۰۱ تا ۰/۲۵ متغیر است. در طبیعت تغییرات مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه به صورت شارپ نیست. زونهای انتقالی وجود دارند.



زون بندی آبدهی ویژه (b)

زون بندی هدایت هیدرولیکی (a)

شکل ۴-۲۴- زون بندی نهایی محدوده مطالعاتی بعد از مرحله واسنجی

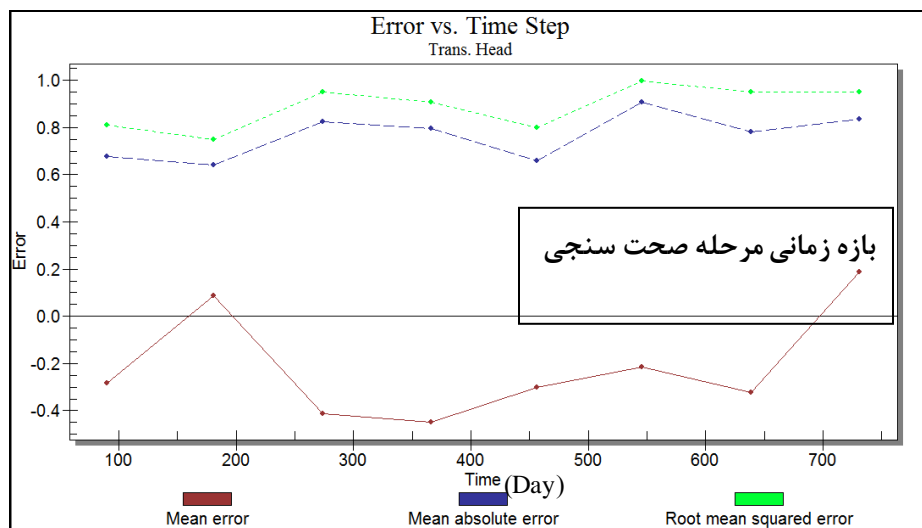
#### ۴-۹- تحلیل حساسیت مدل

آنالیز حساسیت فرآیندی است که در طول آن میزان درک مدل ساز از فرآیند شبیه سازی توسط مدل و سیستم شبیه سازی شده افزایش می یابد و می توان گفت اولین مرحله از تمرین واسنجی می باشد که به وسیله آن حساسیت کلیه پارامترهای سیستم شناخته خواهد شد. در بیشتر مدل های کاربردی باید یک تحلیل حساسیت از خصوصیات خروجی مدل در ارتباط با خصوصیات ورودی مدل انجام شود. پس از اجرای مکرر مدل آبخوان شهر مشهد، مشخص شد مدل ناپایدار نسبت به میزان تغذیه و ضریب

رسانایی GHB، ضرایب هیدرودینامیک K و Sy بیشترین حساسیت و نسبت به تراز توپوگرافی و تراز سنگ کف کمترین حساسیت را نشان می‌دهد.

#### ۴-۱۰- صحت سنجی مدل

صحت سنجی فرآیندی است که در طول آن مدل از نظر پارامترهای بدست آمده از مرحله واسنجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ترکیب نهایی زمانی قابل قبول است که کاربر بدون تغییر مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره در دوره زمانی دیگری که می‌تواند قبل یا بعد از زمان واسنجی باشد به نتایج قابل قبول برسد. از سوی دیگر زون بندی نهایی و شرایط مرزی دوره واسنجی در طی دوره صحت سنجی باید ثابت بماند. صحت سنجی در واقع آزمون ضرایب هیدرودینامیک K و Sy بدست آمده از واسنجی مدل است. برای این مرحله از داده‌ها و اطلاعات سطح ایستابی آبان ۱۳۸۸ تا مهر ۱۳۸۹ استفاده گردید. این داده‌ها به صورت تنش‌های فصلی به مدل وارد شد و به این ترتیب مقدار بار هیدرولیکی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفت. در طی فرایند صحت‌سنجی سعی شد اختلاف جزئی موجود در برخی از پیژومترها را با تغییر برخی پارامترها در حد مجاز برطرف کنیم. مدل در پایان دوره صحت سنجی، توانست نتایج قابل قبولی ارائه دهد (شکل ۴-۲۵).



شکل ۴-۲۵- انواع میانگین خطاها در دوره‌های زمانی

## ۴-۱۱- محاسبه بیلان آب زیرزمینی آبخوان شهر مشهد

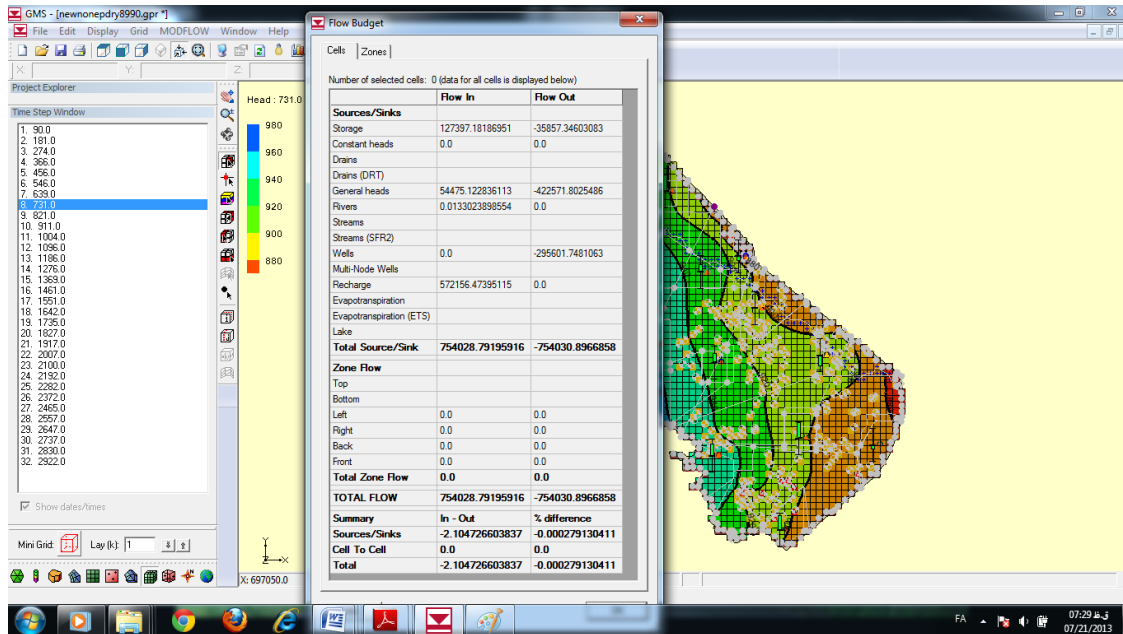
یکی از اهداف مطالعات هیدروژئولوژی آبخوان‌ها، ارزیابی کمی آب زیرزمینی می‌باشد. بر آورد پتانسیل کمی زمانی مورد توجه قرار می‌گیرد که در اثر خشکسالی و یا برداشت بیش از حد مجاز از آبخوان نوعی عدم تعادل بین ورودی‌ها و خروجی‌های منطقه به وجود آید و منجر به خشک شدن چاه‌ها و یا افزایش هزینه پمپاژ بهره‌برداری شود. با آگاهی از بیلان آب منطقه می‌توان مدیریت مناسبی را برای استحصال و تأمین آب اعمال نمود. چنانچه بیلان منفی باشد، برداشت بیش از اندازه از آب زیرزمینی، آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان در اثر افت کیفیت آب و همچنین نشست زمین را به دنبال خواهد داشت. در رابطه زیر معادله بیلان آب زیرزمینی نشان داده شده است و به‌طور کلی پارامترهای بیلان شامل ورودی‌ها و خروجی‌ها هستند.

رابطه (۴-۱)

$$\Delta S = R_N + Q_i - X - Q_o - E$$

$\Delta S$ ؛ تغییر در ذخیره آب زیرزمینی،  $R_N$ ؛ تغذیه در اثر بارندگی و تغذیه سطحی،  $Q_i$  جریان‌های ورودی زیرزمینی،  $Q_o$  جریان‌های خروجی زیرزمینی،  $X$  خروجی در اثر پمپاژ و  $E$  تبخیر و تعرق است. پس از اجرای مدل با توجه به نتایج مدل، بیلان آب زیرزمینی آبخوان شهر مشهد برای سال آبی ۸۸-۸۹ مورد بررسی قرار گرفت. پس از تهیه و تصحیح پارامترهای هیدروژئولوژی طی اجرای مدل در حالت پایدار و نیز در حالت ناپایدار (در دوره‌های مختلف) و انجام صحت‌سنجی، بیلان نهایی آبی مدل کمی آبخوان شهر مشهد در دوره آخر صحت‌سنجی (در سال آبی ۸۸-۸۹) محاسبه گردید (شکل ۴-۲۶). شکل بیانگر ناچیز بودن تفاوت ناشی از پارامترهای بیلان آبی می‌باشد و مقدار آن برابر ۰/۰۰۰۲۸- است که دقت مدل‌سازی را نشان می‌دهد. قابل توجه است که متوسط مقدار بارندگی در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸، در سطح شهر مشهد ۱۶۲ میلی‌متر می‌باشد.





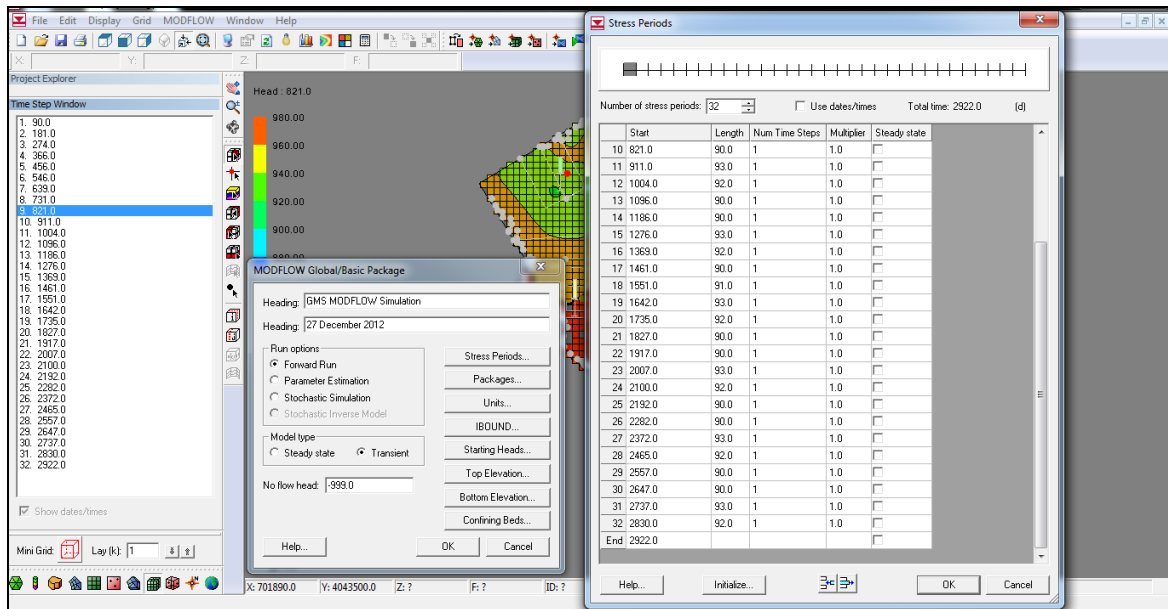
شکل ۴-۲۶- بیان آبی مدل آبخوان شهر مشهد در استرس پرلود هشتم

در شکل مربوط به بیان، Storage ذخیره آبخوان می‌باشد. Recharge میزان ورودی یا نفوذی است که توسط بسته تغذیه بر آبخوان اعمال می‌شود، Wells به معنی چاه است و میزان تخلیه آبخوان توسط چاه را بر آبخوان اعمال می‌نماید. ET تبخیر و تعرق را نمایش می‌دهد که در صورت وجود توسط بسته تبخیر و تعرق به آبخوان وارد می‌شود. Constant Head نیز مقدار ورود و خروج آب زیرزمینی توسط شرایط مرزی بار ثابت را نشان می‌دهد که با توجه به عدم حضور این نوع مرز در مدل آبخوان شهر مشهد مقدار آن صفر به دست آمده است، مقدار ورود و خروج آب زیرزمینی توسط شرایط مرزی با بار عمومی را GHB ارائه می‌دهد.

#### ۴-۱۲- پیش‌بینی مدل

بعد از مرحله واسنجی و اطمینان از صحت عملکرد مدل، می‌توان از آن جهت پیش‌بینی وضعیت تراز سطح آب زیرزمینی در آینده استفاده کرد. در واقع شبیه‌سازی یک آبخوان به منظور پیش‌بینی رفتار آینده سیستم در مقابل گزینه‌های مختلف تغذیه یا تخلیه صورت می‌گیرد. با استفاده از مدل ریاضی می‌توان وضعیت آینده آبخوان را طی چند سال آتی مورد ارزیابی قرار داد و روش بهینه برای مدیریت

آبخوان را پیشنهاد کرد. انتخاب سناریوی پیش بینی با توجه به هدف مدلسازی صورت گرفت که بررسی سطح آب زیرزمینی پس از توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب می‌باشد (شکل ۴-۲۷).



شکل ۴-۲۷- زمان بندی مدل سازی دوره پیش بینی

به منظور پیش بینی سطح آب زیرزمینی در شرایط تکمیل طرح، روند برداشت آب زیرزمینی نیز مانند سال‌های گذشته در نظر گرفته شد اما میانگین بارش سالانه دراز مدت به صورت فصلی به مقدار تغذیه افزوده شده است و تغذیه بر اساس درصد اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۵ به مدل وارد و سپس مدل اجرا گردید (جدول ۴-۳).

جدول ۴-۳- تغذیه ورودی به مدل (آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۰)

سال آبی	درصد اتصال به شبکه جمع‌آوری فاضلاب	درصد نفوذ به آبخوان بر حسب تغذیه کل
۸۹ - ۹۰	۲۵٪	۷۵٪
۹۰ - ۹۱	۳۵٪	۶۵٪
۹۱ - ۹۲	۴۵٪	۵۵٪
۹۲ - ۹۳	۵۵٪	۴۵٪
۹۳ - ۹۴	۶۵٪	۳۵٪
۹۴ - ۹۵	۷۵٪	۲۵٪

پس از اجرای سناریوی توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب، پیژومترهای محدوده مطالعاتی با افت سطح ایستابی قابل ملاحظه‌ای مواجه شدند. افت سطح آب در پیژومترها با توجه به موقعیت آنها نسبت به چاه‌های بهره‌برداری، بافت خاک و ضخامت سفره آب زیرزمینی تغییر می‌کند. از نظر تغییرات تراز آب پیژومترهای محدوده مطالعاتی به سه گروه قابل تقسیم هستند:

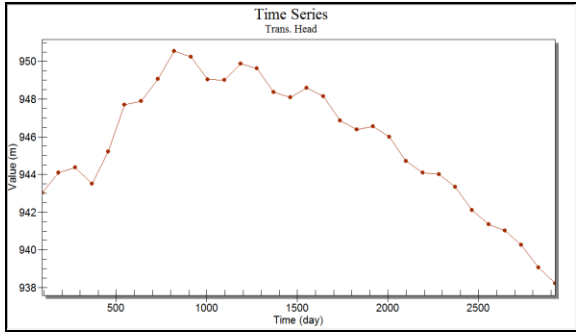
گروه ۱- کاهش منظم تراز آب

گروه ۲- کاهش عمومی تراز آب ولی به طور نا منظم

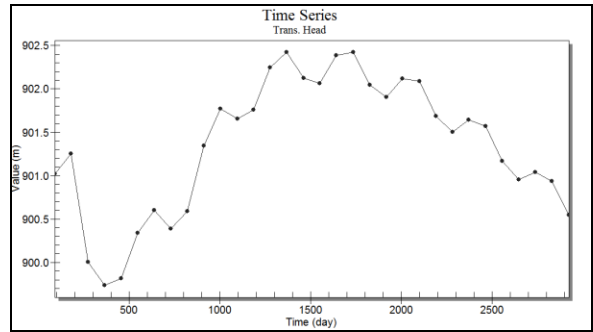
گروه ۳- روند افزایشی- کاهشی تراز آب

در هیدروگراف پیژومترهای واقع در پارک ملت، اراضی قاسم آباد، خین عرب، قهقهه و امرقان فردوسی کاهش منظم تراز آب مشاهده می‌شود. در پیژومترهای بلوار تلویزیون، التیمور، بلوار فردوسی، مسگران، انبار سیس آباد، قاسم آباد و کلاته برفی کاهش عمومی تراز آب ولی به طور نا منظم وجود دارد. قبل از اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب، سطح ایستابی در پیژومترهای خواجه اباصلت، دستگردان، بلوار جنگل، قلعه ساختمان و بلوار راه‌آهن روند افزایشی داشته است که در حین اجرای طرح با گذشت زمان سیر نزولی می‌یابد (شکل ۴-۲۸).

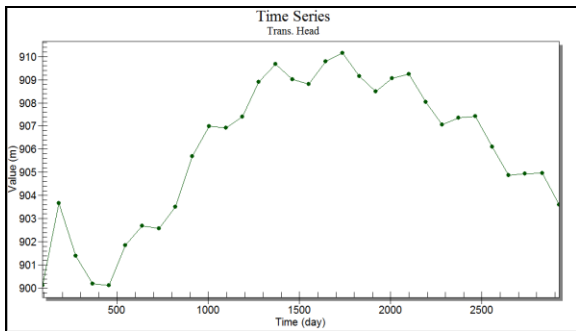
بیشترین افت در پیژومترهای محدوده شهری مثل التیمور و اراضی قاسم آباد (حدود ۲۰ متر) مشاهده می‌شود که تعداد چاه‌های پمپاژ در اطراف آنان بالاست. در جنوب شرق منطقه، پیژومتر قلعه ساختمان به علت بافت خاک ریزدانه منطقه و نیز پایین بودن مقدار هدایت هیدرولیکی بیشترین مقدار افزایش سطح آب (۱ متر) صورت گرفته است. به طور کلی در دشت مشهد به دلیل حفر چاه‌های غیر مجاز و برداشت بیش از حد، افت سطح آب زیرزمینی همواره تا به امروز ادامه پیدا کرده است. پیژومتر مسگران زمان‌بندی مراحل مختلف مدل‌سازی را نشان می‌دهد. با تعمیم زمان‌بندی آن به بقیه پیژومترها تغییرات سطح ایستابی در هر مرحله برای هر پیژومتر مفهوم خواهد بود.



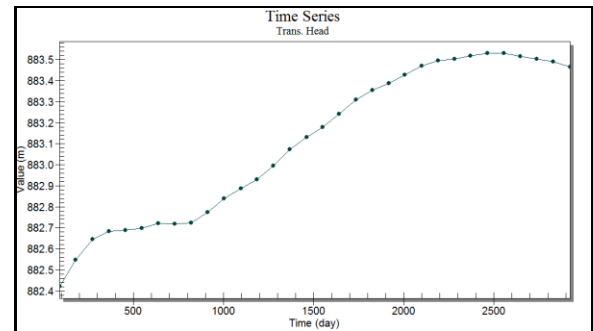
پیزومتر بلوار جنگل



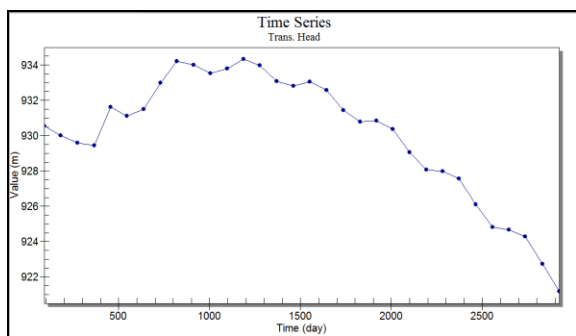
پیزومتر خواجه اباصلت



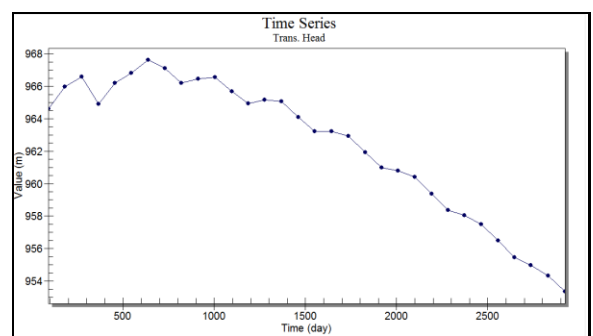
پیزومتر قلعه ساختمان



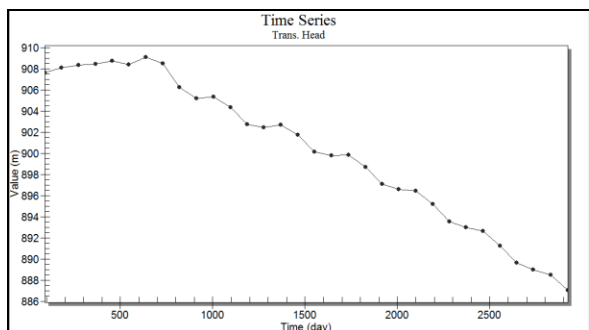
پیزومتر دستگردان



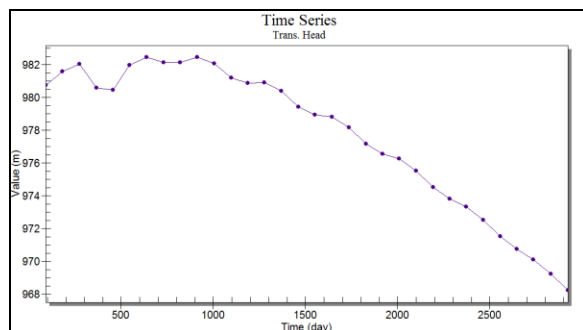
پیزومتر بلوار راه آهن



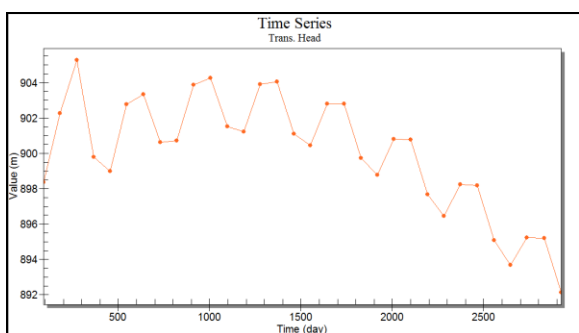
پیزومتر بلوار تلویزیون



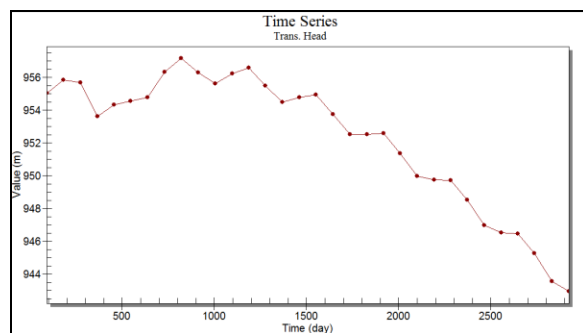
پیزومتر التیمور



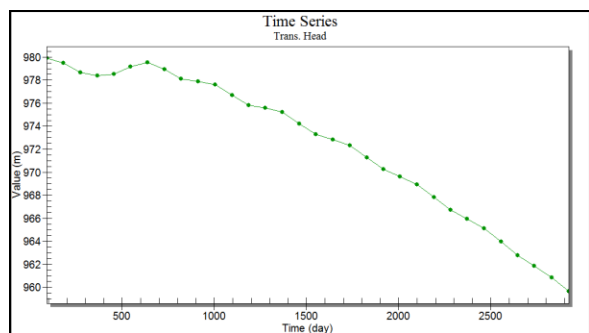
پیزومتر پارک ملت



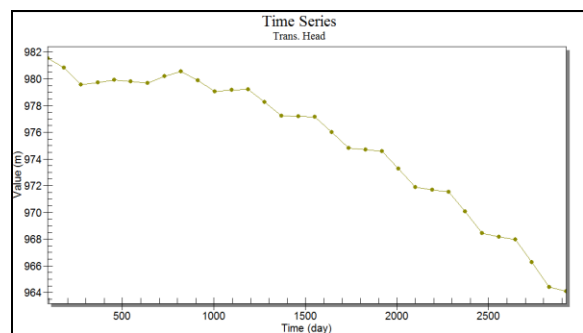
پیزومتر انبار سیس آباد



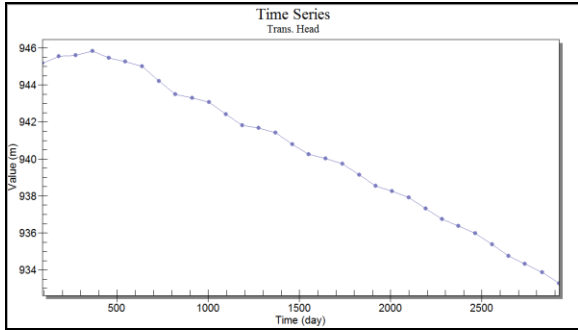
پیزومتر بلوار فردوسی



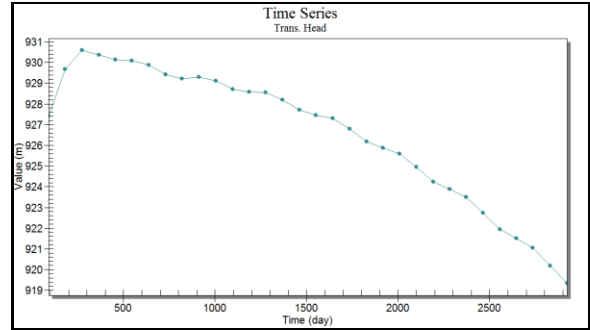
پیزومتر اراضی قاسم آباد



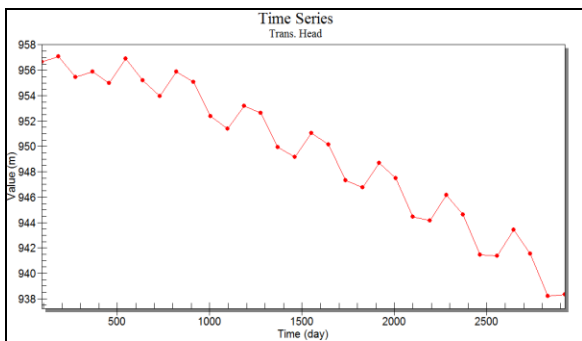
پیزومتر قاسم آباد



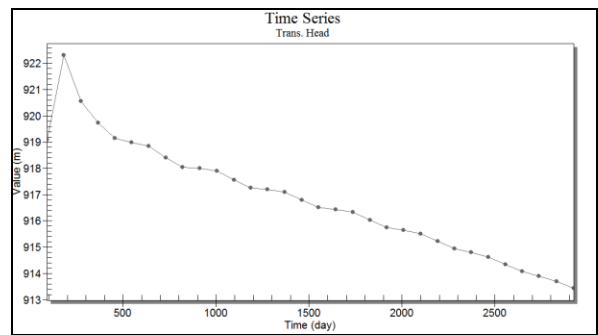
پیزومتر فقهه



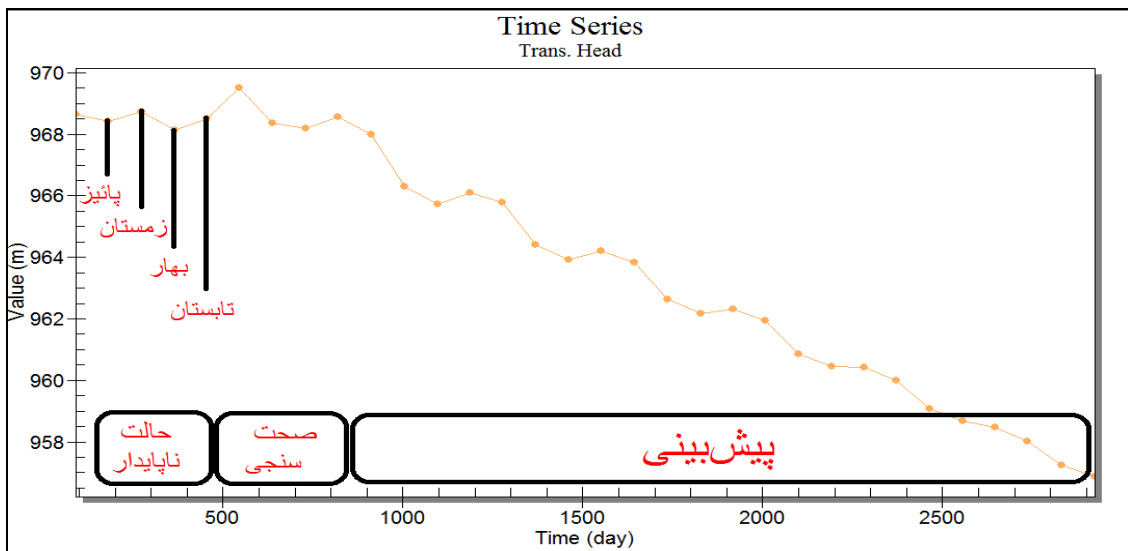
پیزومتر خین عرب



پیزومتر کلاته برفی



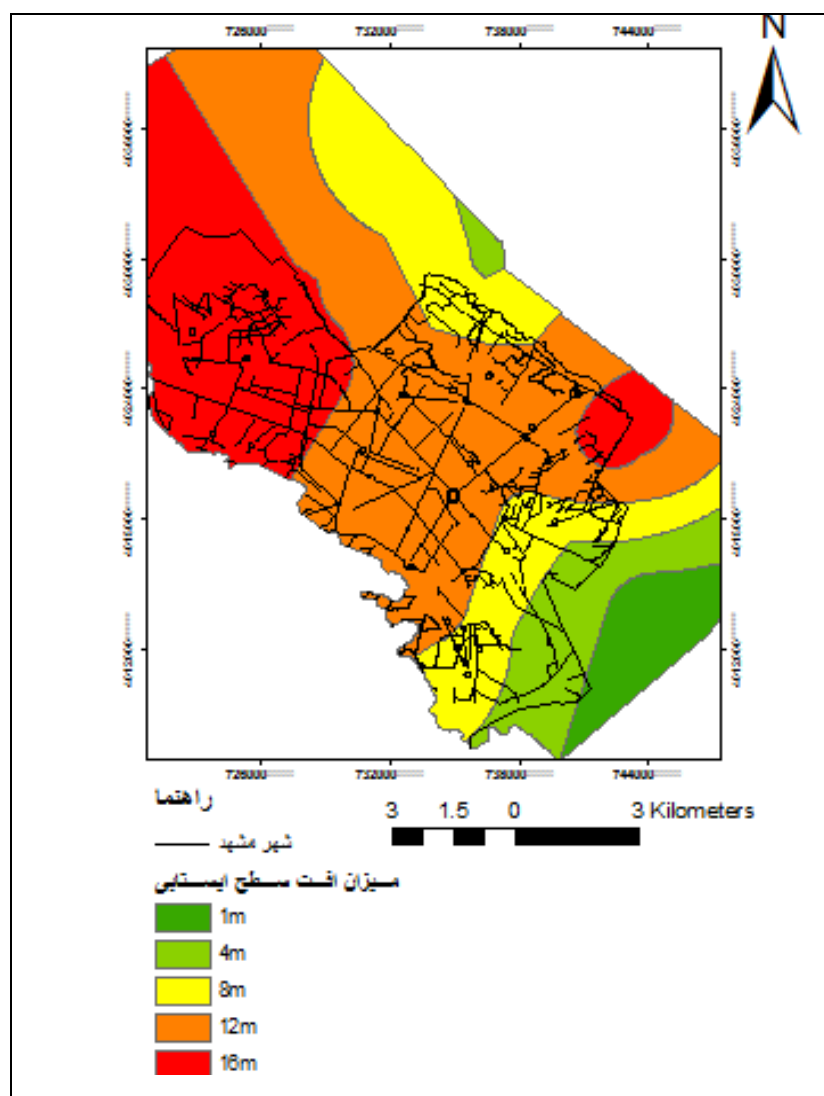
پیزومتر امرقان فردوسی



پیزومتر مسگران

شکل ۴-۲۸- تغییرات سطح آب پیزومترهای محدوده مطالعاتی در طی مدل سازی (سالهای آبی ۱۳۸۷-۱۳۹۵)

پس از اجرای سناریوی توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب، متوسط افت سطح ایستابی در محدوده مطالعاتی برای سالهای ۱۳۸۹-۱۳۹۵ از ۱ تا ۱۶ متر پیش‌بینی می‌شود (شکل ۴-۲۹).



شکل ۴-۲۹- تغییرات افت سطح ایستابی پس از اجرای مدل

## فصل پنجم: ارزیابی نشست زمین در محدوده شهر مشهد

### ۵-۱- مقدمه

بهره‌برداری غیر مجاز منابع آب زیرزمینی، عامل اصلی ایجاد فرونشست در بیشتر دشتهای ایران و جهان می‌باشد. این موضوع وقتی اهمیت می‌یابد که بدانیم ایران در رتبه سوم برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در دنیا قرار دارد. خطر نشست بر اثر افت آب‌های زیرزمینی یک مسئله شناخته شده می‌باشد. حالت تصاعدی این پدیده به دهه‌های اخیر مربوط می‌شود که درست مصادف با اوج صنعتی شدن و شهرنشینی و پمپاژ بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی است. استخراج آب زیرزمینی باعث کاهش سطح آب زیرزمینی، افزایش تنش مؤثر وارد بر لایه‌های زیرین خاک، تحکیم این لایه و در نتیجه باعث فرونشست سطح زمین می‌شود. شهر مشهد نیز از این قاعده مستثنی نیست. سطح آب زیرزمینی در آبخوان آن به طور مداوم پایین رفته و با کسری مخزن سالیانه حدود ۲۴ میلیون متر مکعب مواجه است. در این فصل با استفاده از نتایج مدل‌سازی آبخوان شهر مشهد به بررسی تاثیر توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب بر فرونشست زمین در محدوده شهر مشهد پرداخته می‌شود.

### ۵-۲- مکانیزم فرونشست

عامل اصلی نشست در منطقه مورد مطالعه، استخراج آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در مناطقی که با بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و بیلان منفی حوضه آبریز مواجه هستند، افزایش تنش مؤثر خاک دلیل اصلی فشردگی لایه‌های زمین به شمار می‌رود. تنش مؤثر در هر عمقی از خاک از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

رابطه (۵-۱)

$$P_i = P_t - P_h$$



که در آن تنش مؤثر،  $P_t$  تنش کل و  $P_h$  فشار آب منفذی در هر منطقه است. با کاهش فشار آب منفذی ( $P_h$ ) و با این فرض که تغییر وزن مخصوص خاک در اثر افت آب ناچیز است، تغییرات تنش کل ( $P_t$ ) ناچیز بوده و نتیجتاً، تنش مؤثر ( $P_i$ ) در لایه‌های خاک افزایش می‌یابد. به صورت معادل هم می‌توان تصور کرد که فشار آب منفذی کاهش پیدا نکرده است، بلکه افزایش تنش کل ناشی از اعمال بار خارجی، باعث افزایش تنش مؤثر گردیده است. بار خارجی معادل با افت سطح آب زیرزمینی به اندازه  $h$  را مطابق شکل (۱-۵) می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

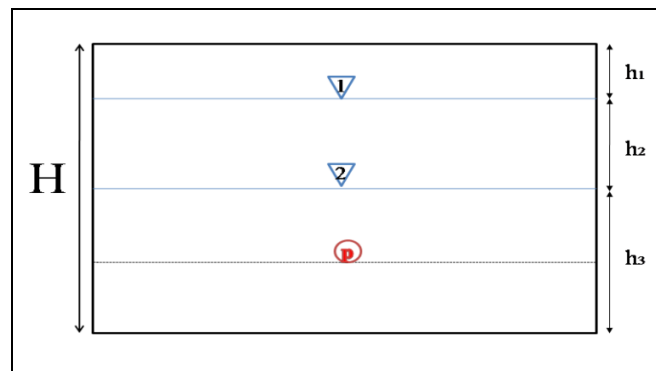
رابطه (۲-۵)

$$P_1 = h_1 \cdot \gamma_d + \left( h_2 + \frac{h_3}{2} \right) \cdot \gamma'$$

$$P_2 = h_1 \cdot \gamma_d + h_2 \cdot \gamma_d + \frac{h_3}{2} \cdot \gamma'$$

$$P_i = \Delta P = P_2 - P_1$$

که در این روابط  $P_1$  تنش مؤثر قائم اولیه،  $P_2$  تنش مؤثر قائم ثانویه و  $\Delta P$  اضافه فشار مؤثر پس از افت سطح آب زیرزمینی به اندازه  $h$ ،  $\gamma_d$  وزن مخصوص خشک خاک و  $\gamma'$  وزن مخصوص غوطه‌ور خاک است.



شکل ۱-۵- تصویر شماتیک تغییرات سطح آب زیرزمینی در پروفیل خاک

در اکثر آبخوان‌ها به علت افزایش بهره‌برداری از منابع آب با کاهش سطح ایستابی در آبخوان‌های آزاد یا کاهش فشار پیرومتری در آبخوان‌های محبوس مواجه‌ایم که هر دو این‌ها باعث کاهش  $P_h$  و در نتیجه افزایش  $P_t$  و نشست لایه‌ها می‌گردد. نشست خاک به دو صورت انجام می‌شود:

### الف- نشست آنی

نشست آنی ناشی از تغییر شکل الاستیک خاک است بدون آن که عمل زهکشی در آن اتفاق افتاده باشد. محاسبات نشست آنی به طور معمول بر پایه روابط به دست آمده از تئوری الاستیسیته قرار دارد. نشست آنی بلافاصله بعد از اعمال بار، بدون تغییری در میزان رطوبت به دست می‌آید. نشست آنی در تمام خاکها بجز خاکهای ریزدانه که درصد اشباع آن بیش از ۹۰ درصد باشد محاسبه می‌شود. نشست آنی یک پی که تحت تنش متقارن قرار دارد از رابطه زیر بدست می‌آید:

رابطه (۵-۳)

$$S_i = P_i \cdot B \frac{1-\mu^2}{E} I_p$$

$S_i$  نشست آنی (متر)،  $P_i$  فشار خالص مؤثر،  $B$  بعد حداقل شالوده (متر)،  $\mu$  ضریب پواسون خاک،  $E$  ضریب الاستیسیته خاک ( $\text{Kg/cm}^2$ ) و  $I_p$  ضریب تأثیر شکل (بدون بعد) می‌باشد. پارامترهای الاستیک خاک  $E$  و  $\mu$  با استفاده از آزمایش تک محوری و نیز با استفاده از تجارب گذشته بر حسب نوع خاک و ارتباط آن با عدد نفوذ استاندارد ( $N$ ) محاسبه می‌گردد. در این رابطه فرض بر این است که فشار  $p$  در سطح زمین تأثیر نماید. در عمل، شالوده‌ها در عمق مشخصی در زیر سطح زمین قرار می‌گیرند. عمق شالوده مقدار نشست  $S_i$  را کاهش می‌دهد و استفاده از رابطه در جهت محافظه کارانه خواهد بود (طاحونی، ۱۳۸۸).

### ب- نشست تحکیمی

نشست خاک‌های چسبنده ریزدانه وابسته به زمان است وقتی که یک لایه خاک رسی اشباع، تحت تأثیر افزایش تنش قرار گیرد، ابتدا نشست آنی رخ می‌دهد، اما از آنجا که ضریب نفوذ پذیری رس به

طور قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر است، زهکش آب حفره‌ای به سرعت انجام نشده و از بین رفتن اضافه فشار آب منفذی ناشی از بار گذاری به طور تدریجی و در یک زمان طولانی رخ می‌دهد. بنابراین کاهش حجم خاک به مدت طولانی بعد از بار گذاری و نشست آبی ادامه خواهد داشت. در خاک‌های رسی نرم نشست تحکیمی چندین برابر نشست آبی است (Das, 1994; Bowelse, 1988).

نشست تحکیمی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

رابطه (۴-۵)

$$S_c = \frac{H \cdot C_c}{1 + e} \log \frac{P_2}{P_1}$$

که در این رابطه  $S_c$  نشست تحکیمی (متر)،  $H$  ضخامت کل لایه (متر)،  $C_c$  شاخص فشردگی،  $e$  پوکی اولیه،  $P_2$  تنش مؤثر حالت ثانویه و  $P_1$  تنش مؤثر حالت اولیه می‌باشد.

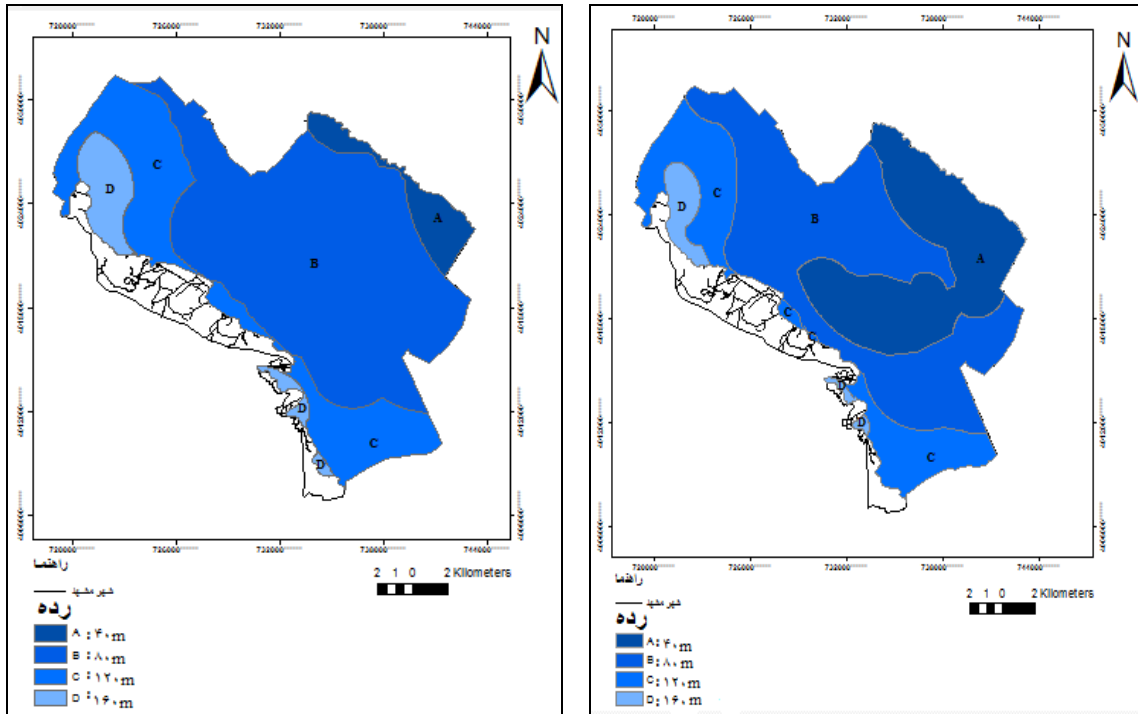
### ۵-۳- ارزیابی فرونشست زمین در سطح شهر مشهد

برای محاسبه فرونشست از نتایج مدل‌سازی با نرم افزار GMS استفاده شد. به این صورت که عمق سطح ایستابی قبل و بعد از اجرای مدل از نرم افزار GMS استخراج و وارد نرم افزار GIS گردید. عمق سطح ایستابی در محدوده مورد مطالعه به ۴ رده تقسیم گردید (جدول ۵-۱).

جدول ۵-۱- رده بندی عمق سطح آب زیرزمینی در محدوده شهر مشهد

عمق (m)	Class
۰-۴۰	A
۴۰-۸۰	B
۸۰-۱۲۰	C
۱۲۰-۱۶۰	D

منطقه بندی عمق سطح ایستابی آبخوان مشهد قبل از توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب و بعد از آن در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.

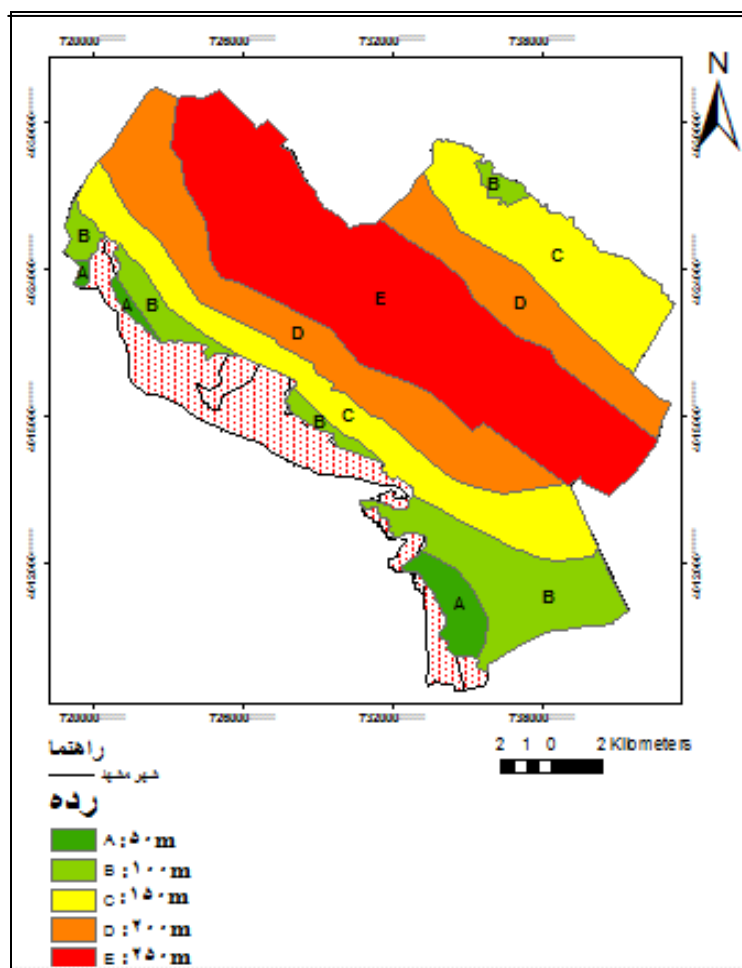


شکل ۵-۲- (الف): منطقه بندی عمق سطح ایستابی آبخوان مشهد قبل (سال آبی ۸۹) و (ب): بعد از اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب (سال آبی ۹۵)

بر اساس رستر DEM لایه توپوگرافی منطقه مطالعاتی تهیه شد. لایه سنگ کف مشهد نیز پس از بررسی لاگ‌های حفاری و نتایج مطالعات ژئوفیزیک لرزه‌ای و اطلاعات ژئوفیزیک آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی به دست آمد. با ساخت این دو لایه در محیط GIS و تفریق رستری نقشه ضخامت آبرفت ترسیم گردید (شکل ۵-۳). آبرفت نیز بر اساس ضخامت به ۵ رده تقسیم گردید (جدول ۵-۲).

جدول ۵-۲- رده بندی ضخامت آبرفت در محدوده مورد مطالعه

Class	ضخامت (m)
A	۰-۵۰
B	۵۰-۱۰۰
C	۱۰۰-۱۵۰
D	۱۵۰-۲۰۰
E	۲۰۰-۲۵۰

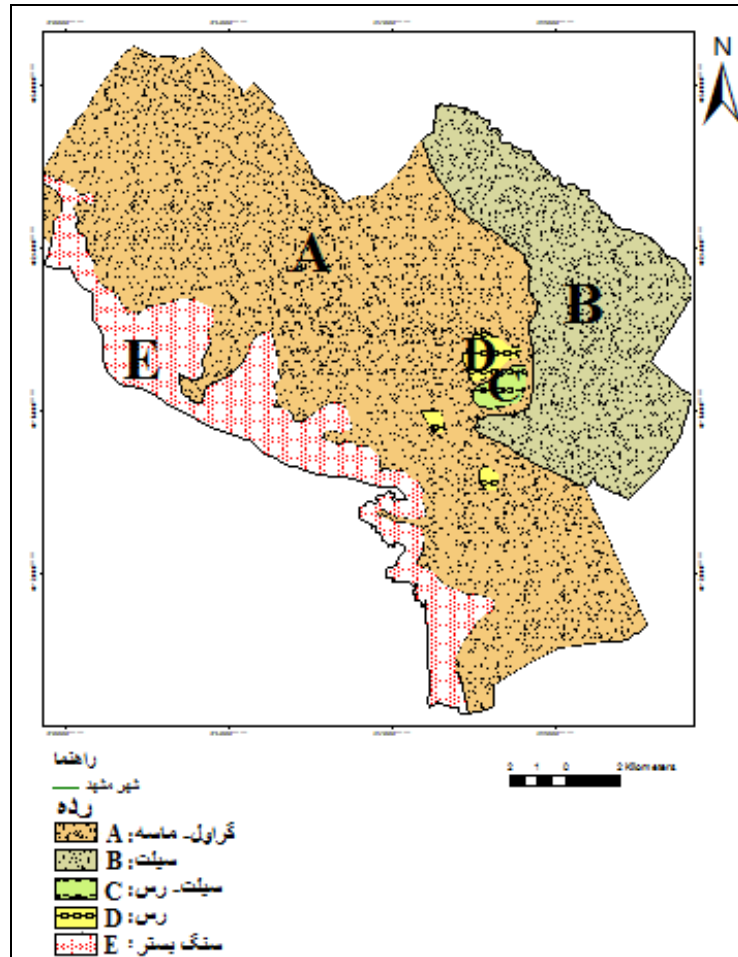


شکل ۳-۵- نقشه هم‌ضخامت آبرفت محدوده مطالعاتی

شکل (۴-۵) جنس نهشته‌های آبرفتی (بافت خاک) در نقاط مختلف شهر مشهد را نشان می‌دهد (حافظی مقدس، ۱۳۸۶). نقشه بافت خاک شهر مشهد نیز بر اساس بافت غالب آن به ۵ رده تقسیم شده است (جدول ۳-۵).

جدول ۳-۵- رده بندی آبخوان آبرفتی شهر مشهد بر حسب بافت خاک غالب

بافت خاک	TYPE
گراول- ماسه	A
سیلت	B
سیلت- رس	C
رس	D
سنگ بستر	E



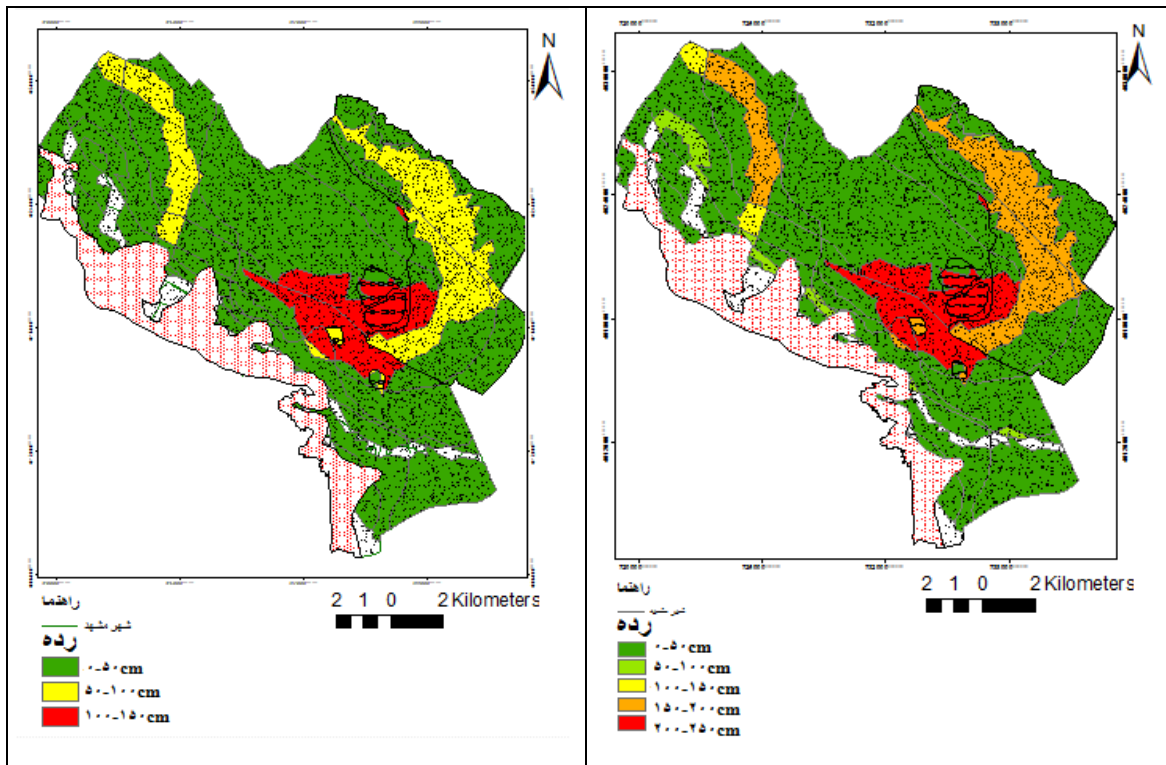
شکل ۴-۵- نقشه بافت خاک شهر مشهد (حافظی مقدس ۱۳۸۶)

پس از تهیه نقشه‌های عمق سطح ایستابی در قبل و بعد از اجرای طرح، ضخامت آبرفت و بافت خاک این چهار نقشه با هم ترکیب شده و حالات غیر ممکن برای فرونشست از آن جدا شده است. به عنوان مثال ضخامت آبرفت منطقه‌ای ۱۰۰ متر است اما عمق سطح ایستابی در آن ۱۲۰ متر می‌باشد جزء حالات غیر ممکن قرار می‌گیرد. در شکل (۵-۵) به صورت بی‌رنگ دیده شده است. برای محاسبه فرونشست کل، مجموع نشست آبی و نشست تحکیم بررسی می‌شود. فرونشست در شهر مشهد بر اساس شاخص فشردگی و ضریب تحکیم در دو حالت قابل ارزیابی است (جدول ۴-۵).

جدول ۴-۵- محاسبه حداکثر و حداقل میزان فرونشست بر حسب شاخص فشردگی و ضریب تحکیم

حالت	شاخص فشردگی	ضریب تحکیم
۱	۰/۳	۰/۰۳
۲	۰/۱۵	۰/۰۱۵

هرچه شاخص فشردگی ( $C_e$ ) بیشتر باشد میزان ضریب تحکیم ( $C_p$ ) نیز بالاتر است بنابراین میزان فرونشست بیشتر است. حداکثر میزان فرونشست براساس ویژگی‌های حالت ۱ و حداقل میزان فرونشست بر اساس ویژگی‌های حالت ۲ محاسبه می‌شود. شکل (۵-۵) بیشترین و کمترین میزان فرونشست در منطقه را در زمان بی‌نهایت نشان می‌دهد.



شکل ۵-۵- (الف): رده بندی حداکثر میزان فرونشست و (ب): حداقل میزان آن بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری

#### فاضلاب در سطح شهر مشهد

در شکل سمت راست فرونشست‌ها بر مبنای مقدار به ۵ رده تقسیم شده‌اند. بیشترین میزان فرونشست در منطقه ۲۵۰ سانتی‌متر نشان داده شده است. شکل سمت چپ به ۳ رده تقسیم گردیده است و بالاترین میزان نشست در آن ۱۵۰ سانتی‌متر بوده است. محدوده شهر مشهد در هر دو حالت بر اساس میزان خطر پذیری به ۳ گروه تقسیم‌بندی شده است (جدول ۵-۵).

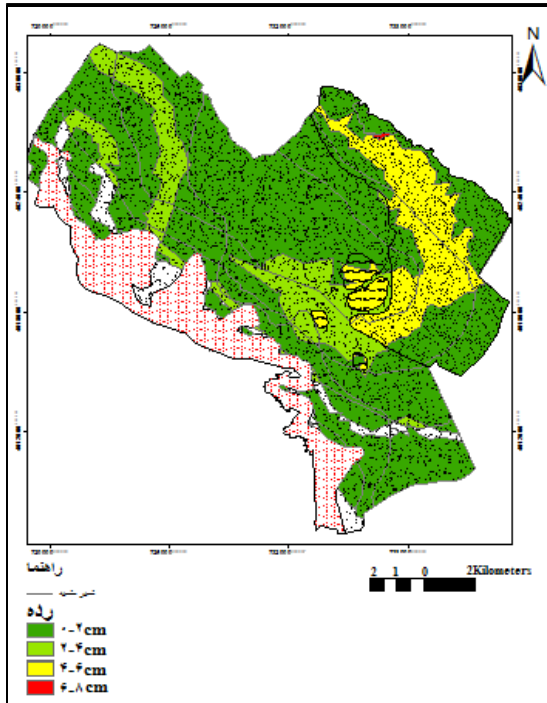
جدول ۵-۵- منطقه بندی محدوده شهر مشهد بر حسب میزان فرونشست و پتانسیل خطر

فرونشست (cm)	Zone	پتانسیل خطر
<۵۰	A	کم
۵۰-۱۰۰	B	متوسط
>۱۰۰	C	زیاد

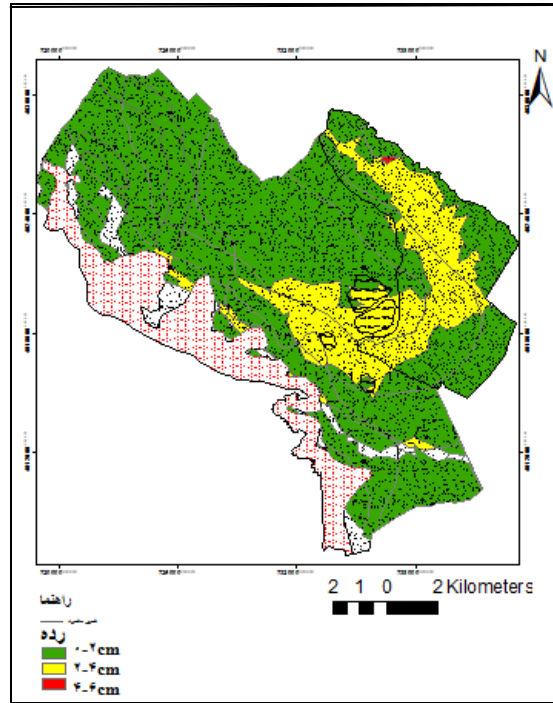
بخش وسیعی از شهر مشهد در زون A قرار داشته و میزان فرونشست در این منطقه زیر ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. بخشی نیز در زون B بوده است و میزان فرونشست آن از ۵۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند. این زون در حالت اول قسمتی از شمال غرب محدوده مطالعاتی و در حالت دوم علاوه بر منطقه شمال غرب، شمال شرق شهر مشهد را نیز در برمی‌گیرد. بیشترین خطر پذیری مربوط به محدوده‌هایی با بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر فرونشست است که جزء زون C محسوب می‌شوند. در حالت دوم بخش‌هایی از مرکز و شرق شهر مشهد را شامل می‌گردد. در حالت اول به جز مناطق یاد شده منطقه شمال شرق و قسمت اندکی از شمال غرب را پوشش می‌دهد. اگر بر اساس میزان فرونشست شهر مشهد، پهنه بندی پتانسیل خطر انجام شود، زون C جزء مناطق با حداکثر پتانسیل خطر و به ترتیب زون B با خطر متوسط و زون A با حداقل پتانسیل خطر طبقه‌بندی می‌گردد. مناطق با حداقل پتانسیل خطر وسعت بیشتری از شهر مشهد را در بر می‌گیرد. وسعت منطقه با پتانسیل خطر متوسط نیز نسبتاً کم است. در حالت دوم به دلیل واقع شدن آن در مناطق پر جمعیت حائز اهمیت است. هرچند وسعت منطقه با حداکثر پتانسیل خطر خیلی کم بوده اما قرارگیری آن در بافت فرسوده شهری نیازمند توجه بیشتری می‌باشد.

می‌توان میزان فرونشست در منطقه را نیز بر حسب گذشت زمان، بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب در حالت‌های ۱ و ۲ بررسی کرد ((شکل ۵-۶) و (شکل ۵-۷)). حداکثر میزان فرونشست در حالت ۱ نسبت به حالت ۲ در مقاطع زمانی مشابه بالاتر است. بررسی توالی زمانی فرونشست در هر دو گروه نشان می‌دهد که با گذشت زمان و بیشتر شدن عامل زمان ( $T_v$ ) میزان درصد تحکیم (U) نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه میزان حداکثر فرونشست در گروه ۱ و ۲ با گذشت زمان افزایش می‌یابد.

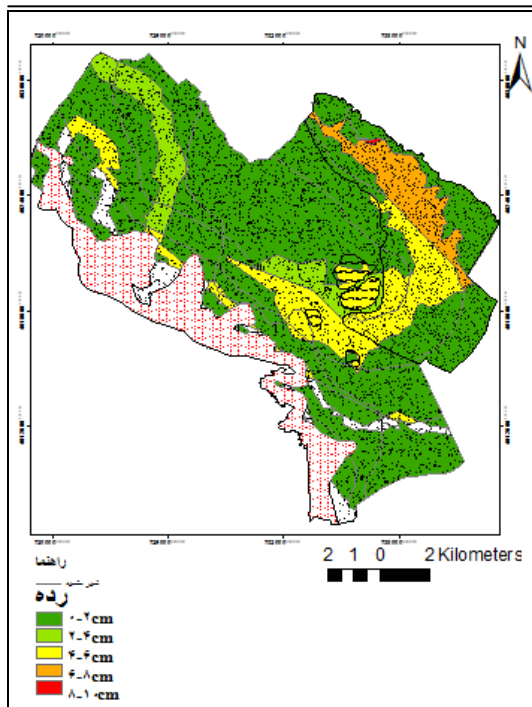




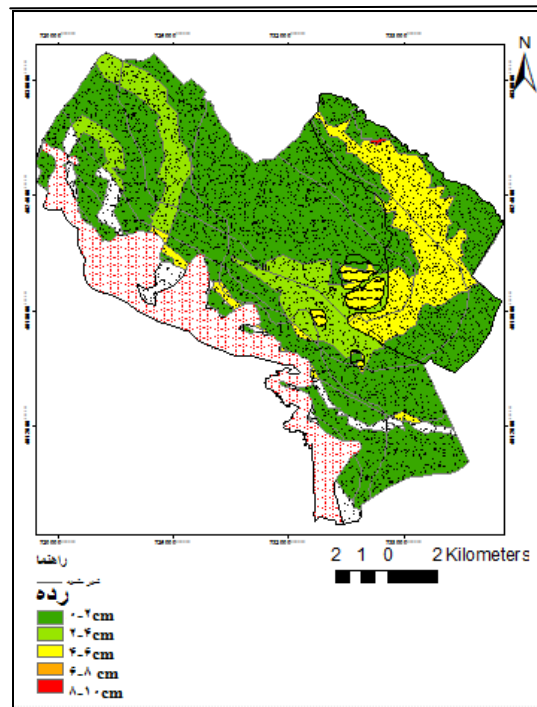
پنج سال بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب



یک سال بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب



پانزده سال بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب



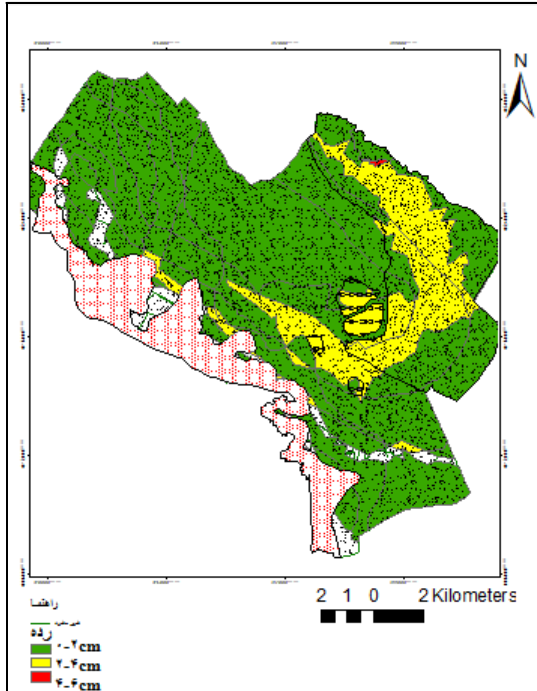
ده سال بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب

شکل ۵-۶- بررسی میزان فرونشست با گذشت زمان در گروه یک

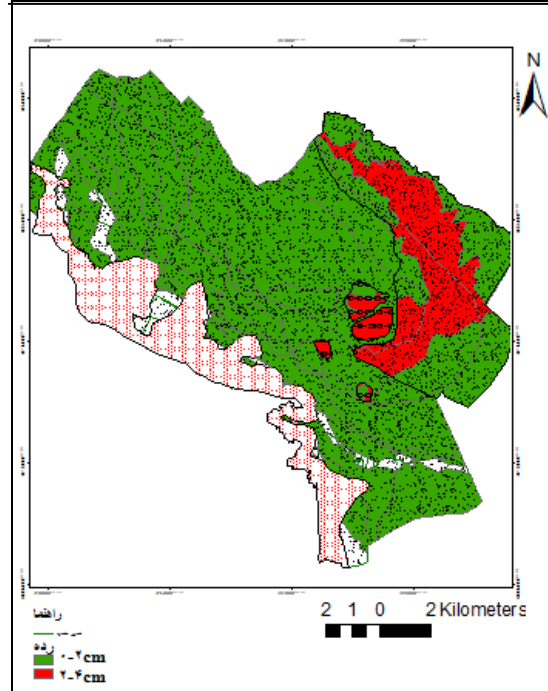
در شکل (۵-۶) میزان حداکثر فرونشست در پنج سال بعد از تکمیل طرح (سال ۱۴۰۰) نسبت به یک سال بعد از آن (۱۳۹۶) افزایش می‌یابد. همچنین مقدار بیشترین نشست در پانزده سال بعد از تکمیل طرح (سال ۱۴۱۰) نسبت به سال‌های اولیه پایان طرح افزایش یافته است. شاید میزان حداکثر فرونشست در سال ۱۴۱۰ نسبت به پنج سال قبل از آن (سال ۱۴۰۵) بدون تغییر مانده باشد اما وسعت فرونشست در بازه ۶ تا ۸ سانتی‌متر (در سال ۱۴۱۰) افزایش چشمگیری نشان می‌دهد.

در حالتی که ضریب تحکیم کمترین مقدار خود را دارد (گروه ۲)، میزان حداکثر فرونشست بعد از گذشت پانزده سال از تکمیل طرح بیشتر از ۴ تا ۶ سانتی‌متر نخواهد شد (شکل ۵-۷).

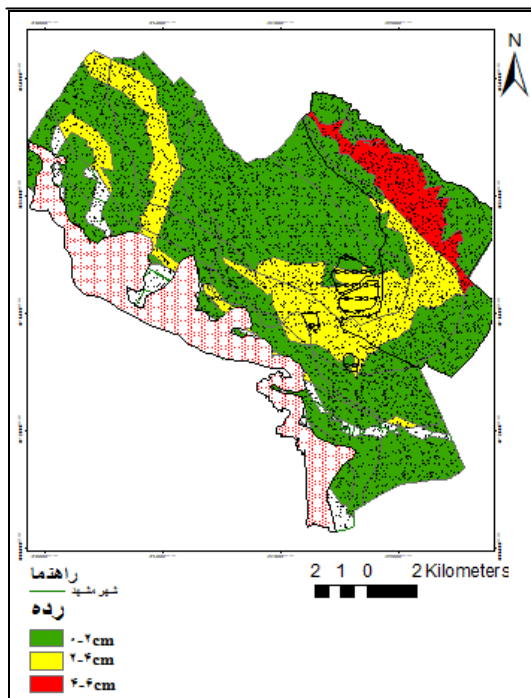
بررسی هر دو حالت ممکن رخداد فرونشست در منطقه نشان می‌دهد که آهنگ نشست در سطح شهر مشهد از روند یکنواختی در طی زمان برخوردار است. با گذشت زمان نرخ فرونشست و مساحت آن در شمال شرق و شمال غرب شهر در حال افزایش است. فرونشست در شمال غرب منطقه مطالعاتی به دلیل افت عمومی سطح آب زیرزمینی در آبخوان و بافت خاک درشت دانه رو به رشد است اما در شمال شرق شهر علاوه بر افت سطح ایستابی، تعداد زیاد چاه‌های پمپاژ نیز در آن بی‌تأثیر نیست.



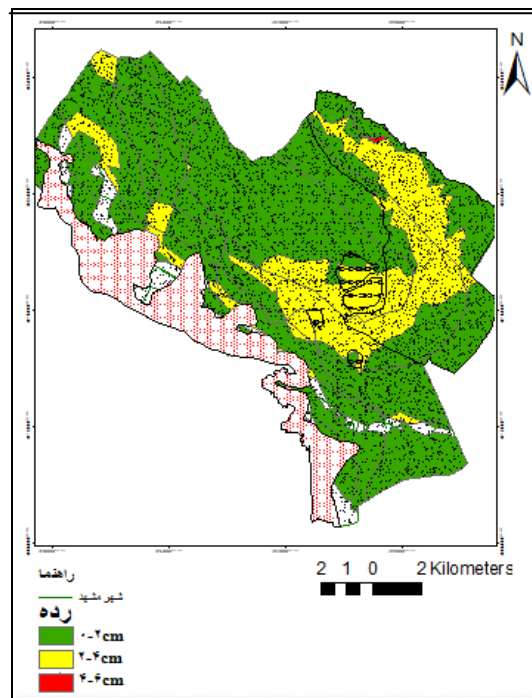
پنج سال بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب



یک سال بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب



پانزده سال بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب



ده سال بعد از تکمیل طرح جمع‌آوری فاضلاب

شکل ۵-۷- بررسی میزان فرونشست با گذشت زمان در گروه دو

## فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۶-۱- مقدمه

بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی باعث افت مداوم سطح آبخوان مشهد گردیده و علاوه بر بیلان منفی رو به رشدی که در نتیجه برداشت‌های اضافی صورت گرفته است، منابع خاک دشت نیز با نمونه‌های مشاهده شده از نشست با تهدید جدی روبرو گردیده است.

قبل از اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب، سامانه دفع فاضلاب خانگی در شهر مشهد و سایر مراکز جمعیتی، سنتی بوده و از طریق چاه‌های جذبی انجام می‌شده است. این موضوع در دراز مدت یکی از منابع عمده تغذیه‌کننده آبخوان شهر مشهد به شمار می‌رفت. توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب و حذف چاه‌های جذبی باعث گسترش فرونشست به سایر مناطق و افزایش بحران در مناطق مستعد گردیده است.

هدف این پژوهش بررسی تأثیر توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب بر فرونشست زمین در سطح شهر مشهد می‌باشد. برای دستیابی به این هدف سطح آب زیرزمینی شهر مشهد تا شعاع ۶ کیلومتری آن با نرم افزار GMS7.1 مدل‌سازی شد سپس نتایج حاصل از آن را به نرم افزار GIS وارد شده و نقشه‌های هم‌عمق سطح ایستابی قبل از اجرای طرح و بعد از ترسیم گردید. در محیط GIS نقشه‌های مورد نظر با نقشه‌های ضخامت آبرفت و بافت خاک شهر مشهد ترکیب شده و نقشه مناطق مستعد فرونشست بعد از توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب ترسیم شده است.

## ۶-۲- نتیجه گیری

با توجه به یافته‌های این تحقیق می‌توان موارد زیر را به عنوان مهمترین نتایج به دست آمده معرفی کرد:  
 با توجه به آمار ۴۰ سال ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مشهد متوسط بارندگی سالانه دشت حدود ۲۶۱/۲ میلیمتر در سال و متوسط دما در حدود ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. طبق روش دومارتن اقلیم منطقه از نوع نیمه‌خشک است.

آبخوان آبرفتی شهر مشهد از نوع آبخوان آزاد می‌باشد. براساس منحنی خطوط تراز سطح آب زیرزمینی جهت جریان آب زیرزمینی از شمال غرب به سمت جنوب شرقی دشت می‌باشد. با توجه به جهت جریان، مرزهای غربی و شمالی دشت به عنوان ورودی آب زیرزمینی بوده و آب از طریق مرزهای شرقی و جنوبی دشت تخلیه می‌گردد.

هیدروگراف معرف آبخوان نشان دهنده سیر نزولی سطح ایستابی می‌باشد. این به دلیل کاهش بارندگی در دهه اخیر، افزایش جمعیت، افزایش حفر چاه‌های پمپاژ و در نتیجه افزایش برداشت آب زیرزمینی از آبخوان مربوطه می‌باشد.

با توجه به منحنی‌های همسان هدایت الکتریکی، میزان هدایت الکتریکی از کناره‌های آبخوان به سمت مرکز محدوده مطالعاتی کاهش می‌یابد به طوری که در مرکز منطقه، به کمترین مقدار خود می‌رسد و در مسیر حرکت جریان (شمال غرب به جنوب شرق) دوباره افزایش می‌یابد.

نتایج طراحی و واسنجی مدل در حالت پایدار و ناپایدار نشان می‌دهد که ضریب هدایت هیدرولیکی در منطقه مورد مطالعه بین ۱ تا ۱۶ متر بر روز متغیر می‌باشد. تغییرات مقدار آبدهی ویژه بهینه شده در حالت ناپایدار تغییراتی از ۰/۰۰۰۰۱ تا ۰/۲۵ نشان می‌دهد.

فرایند حساسیت سنجی مدل نشان داد که مدل طراحی شده نسبت به پارامترها از حساسیت یکسانی برخوردار نیست به گونه‌ای که نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت مدل نسبت به ضریب رسانایی GHB هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه است. میزان پمپاژ و تغذیه به ترتیب در درجات بعدی از اهمیت قرار دارد.

بعد از مرحله واسنجی مدل جهت تأیید و صحت سنجی اجرا گردید که نمایانگر تطابق نسبتاً خوب مدل طراحی شده با شرایط طبیعی است.

با توجه به نتایج حاصل از مرحله پیش‌بینی مدل، سطح آب بعد از اجرای طرح فاضلاب در اکثر چاه‌های مشاهده‌ای به مقدار قابل توجهی پایین می‌آید. این پیزومترها در محدوده شهر واقع بوده و تحت تأثیر تغذیه شهر می‌باشند. بنابراین حذف فاضلاب تأثیر زیادی بر سطح آب آنان داشته است. بالاترین اختلاف سطح آب (به‌طور متوسط ۱۸ متر) در پیزومترهای التیمور، اراضی قاسم آباد، کلاته‌برفی و قاسم‌آباد مشاهده می‌شود که دلیل عمده تمرکز چاه‌های پمپاژ در اطراف این پیزومترهاست. در پیزومترهای قلعه ساختمان، دستگردان و خواجه اباصت اختلاف سطح آب ایجاد شده خیلی کم است (میزان میانگین بالآمدگی ۰/۶ متر) که می‌تواند به دلیل واقع شدن این پیزومترها در مسیر خروجی جریان آب زیرزمینی از آبخوان آبرفتی مشهد و اتصال کند به شبکه جمع‌آوری فاضلاب در این مناطق به علت بافت فرسوده شهری باشد.

بر اساس نتایج بدست آمده توسط مدل، بیلان آبی در سال تهیه مدل ۱۳۸۸-۱۳۸۷ منفی بوده که نشان دهنده کاهش حجم ذخیره آبخوان می‌باشد. با ادامه شرایط ثابت اقلیمی و روند کنونی بهره‌برداری، تراز سطح ایستابی آبخوان در آینده (بعد از تکمیل طرح) پایین خواهد آمد و با بررسی پارامترهای بیلان مشخص می‌شود که بیلان آبی مدل در هفت سال آینده نسبت به سال ۸۸-۸۷ به‌طور متوسط سالیانه ۲۴ میلیون متر مکعب منفی‌تر می‌شود.

پس از بررسی نتایج مدل، نقشه پهنه بندی فرونشست شهر مشهد در نرم افزار GIS تهیه شد. نقشه‌ها بر اساس بیشترین و کمترین میزان فرونشست در منطقه تهیه گردیدند. برنامه‌ریزی و مدیریت بحران بر مبنای نقشه‌های پیش‌بینی حداکثر میزان فرونشست در منطقه صورت می‌گیرد. در این نقشه مقدار فرونشست در بخشی از شمال غرب و ناحیه وسیعی از شمال شرق، شرق و مرکز شهر مشهد بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. این منطقه از لحاظ پتانسیل خطر فرونشست جزء مناطق با حداکثر میزان خطر طبقه‌بندی می‌شود. اما همین مقدار خطر در صورت رخداد فرونشست خسارات جبران ناپذیری

وارد خواهد کرد زیرا این مناطق جزء مناطق مسکونی محسوب شده و عموماً از ساخت و سازهای غیر اصولی و تراکم بالای جمعیت برخوردار است. به سمت غرب محدوده مطالعاتی میزان تغییر فرونشست از ۵۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر متغیر است، که از لحاظ خطر در حد متوسط قرار دارد. حدود ۶۰ درصد مساحت شهر مشهد را مناطق با خطر کم و مقدار فرونشست زیر ۵۰ سانتی‌متر تشکیل می‌دهد. در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی استحصال از چاه‌های پمپاژ ثابت (بر مبنای زمان حال) در نظر گرفته شده است اما در آینده با بروز هرگونه تغییر در میزان برداشت، تغییر در مقدار حداکثر و حداقل فرونشست‌ها حتمی خواهد بود.

### ۳-۶- پیشنهادها

انجام مطالعات ژئوفیزیکی به منظور تعیین دقیق سنگ کف و تهیه مدل مفهومی کامل‌تر و کاربردی‌تر. انجام آزمایشات پمپاژ در نواحی مختلف آبخوان به منظور دستیابی به ضرائب هیدرودینامیکی دقیق‌تر ضروری است.

در حال حاضر آماربرداری از منابع آبی دشت و وضعیت برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، هر هفت سال یک بار انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه آمار موجود یکی از مهمترین ابزارهای ساخت مدل می‌باشد، بهتر است به منظور تهیه بیان دقیق‌تر مدل و مدیریت بهینه منابع آبی در صورت امکان برداشت از منابع آبی به صورت سالیانه انجام گیرد.

با توجه به نتایج حاصل از مدل برای حفظ تعادل آبخوان و جلوگیری از افزایش افت سطح آب می‌بایست از حفر چاه و یا افزایش بهره‌برداری با نصب کنتور بر چاه‌های پمپاژ جلوگیری به عمل آورد. کند نمودن آهنگ بیان منفی دشت مشهد و به تعادل رساندن و نهایتاً توقف افت سطح آب زیرزمینی

هدف نهادهای مدیریت بحران است زیرا آبخوان آبرفتی شهر مشهد جزء آبخوان دشت مشهد است و تنشهای وارده به یکی بر دیگری نیز تاثیر گذار است.

به کارگیری مدیریت منابع آب از طریق اصلاح راندمان و تغییر در الگوی کشت، حذف محصولات پر مصرف آب از الگوی کشت و اجرای طرحهای تغذیه مصنوعی الزامی است.

کنترل و استفاده از آبهای نامتعارف مانند آبهای بازیافتی و آبهای با کیفیت پایین در مصارف غیر شرب (کشاورزی و فضای سبز شهری) و جایگزین نمودن آبهای مناسب برای شرب باید مد نظر قرار گیرد.

نقشه فرونشست شهر مشهد باید با نقشه تقسیم بندی مناطق شهرداری ترکیب شود تا دید بهتری نسبت به نواحی در حال تهدید آینده ارائه دهد. مسئولیت شهرداری با توجه به مطالعات انجام شده، نسبت به بازنگری و بهبود اعمال قوانین ساخت و ساز افزایش می یابد.



## مراجع

- اجل لوئیان ر. و بهادران ب، (۱۳۷۷)، "ارتباط نوسانات آب‌های زیرزمینی با زمین لغزش، نشست و ترک‌های سطحی زمین (بررسی موارد عینی)"، دومین همایش انجمن زمین شناسی ایران، مشهد<sup>۱</sup>.
- اکبری م، جرگه م.ر، مدنی سادات ح، (۱۳۸۸)، "بررسی افت سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطالعه موردی: آبخوان دشت مشهد"، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۶، شماره ۴، ص ۶۳-۷۸.
- الطافی دادگر م، محمد زاده ح، ناصری ح.ر، (۱۳۹۱)، "شبیه سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت بجنورد با تأکید بر تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل ریاضی WFP-C2-ALTA733"، همایش ملی جریان و آلودگی آب، تهران.
- اوریا، ا. (۱۳۸۳)، پایان نامه ارشد: "مدل‌بندی نشست زمین در اثر بار گذاری متناوب ناشی از نوسانات سطح آب زیرزمینی با روش اجزاء محدود"، دانشکده فنی - بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- بخشی پور ج، اسدی ن، آقازاده ن، (۱۳۹۱)، "مدل سازی جریان آب زیرزمینی دشت اشنویه با استفاده از مدل ریاضی GMS"، شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، شیراز.
- بربریان م، قرشی م، شجاع طاهری ج و طالبیان م، (۱۳۷۸) "پژوهش و بررسی نوزمین ساخت، لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه - گسلش در گستره مشهد - نیشابور"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، کتاب شماره ۷۲.
- پیرهادی ع، چیت سازان م، (۱۳۷۸)، "مدیریت منابع آب دشت رامهرمز با استفاده از مدل ریاضی"، مجموعه مقالات سومین همایش زمین شناسی ایران، ص ۱۳۸-۱۳۶.
- چیت سازان م، توسلی م، (۱۳۷۷)، "مدیریت منابع آب دشت مهبیار شمالی با استفاده از مدل ریاضی"، مجموعه مقالات سومین همایش زمین شناسی ایران، ص ۱۴۸-۱۴۶.
- چیت سازان م، کشکولی ح.ع، (۱۳۸۱)، "مدل سازی آب‌های زیرزمینی و حل مسائل هیدروژئولوژی"، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۶۰۶ ص.
- حافظی مقدس ن، (۱۳۸۶) "گزارش مطالعات زمین شناسی مهندسی پروژه ریز پهنه بندی لرزه‌ای شهر مشهد"، سازمان مسکن و شهرسازی استان خراسان رضوی، ۵۲ ص.

<sup>۱</sup> مجموعه مقالاتی که شماره صفحه در آنها درج نگردیده است از نسخه الکترونیکی مجموعه مقالات جمع‌آوری گردیده است.

- حافظی مقدس ن، نیکودل م.ر، قزی ا، (۱۳۹۱)، "ارزیابی نشست حاصل از تراکم خاک‌های دستی در غرب شهر مشهد"، نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد ۶، شماره ۱، ص ۱۳۸۶-۱۳۷۳.
- حسینی س.ع، صادقی فرد م.ر، (۱۳۸۵)، "بررسی علل پدیده نشست در دشت مشهد"، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، تهران.
- داس ب.م، (۱۳۸۸)، "اصول مهندسی ژئوتکنیک"، جلد اول - مکانیک خاک، ترجمه طاحونی ش، چاپ هجدهم، انتشارات پارس آئین، تهران، ۸۳۱ ص.
- درویش زاده ع، (۱۳۷۰) "زمین شناسی ایران" چاپ اول، انتشارات امیر کبیر، تهران، ۹۰۱ ص.
- رستمی خلیج م، محسنی ساروی م، خلیقی سیگارودی ش، سلمانی ح، (۱۳۹۱)، "بررسی توزیع مکانی برخی از آلاینده‌های فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی شهر مشهد با استفاده از روش‌های زمین آماری"، **مجله منابع طبیعی ایران**، دوره ۶۵، شماره ۱، ص ۶۰-۴۹.
- رسولی ی، (۱۳۸۰)، پایان نامه ارشد: "شبیه سازی جریان آب زیرزمینی دشت فشافویه با استفاده از مدل کامپیوتری MODFLOW"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- رنجبر م، جعفری ن، (۱۳۸۸) "بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین در دشت اشتهارد"، **نشریه علمی - پژوهشی انجمن جغرافیای ایران**، دوره ۶، شماره ۱۹، ص ۱۶۵-۱۵۵.
- رهنما راد ج، فیروزان م، (۱۳۸۱) "بررسی تاثیرات پدیده متناوب خشکسالی و فرسایش بر ساختمانها در پهن دشت سیستان"، **نشریه ژئوتکنیک و مقاومت مصالح**، شماره ۸۸، ص ۳۹-۳۰.
- زارع ابانیه م، مهدی پور ف، ناصری ح، (۱۳۸۵)، "پیش‌بینی تأثیر زهکش‌ها بر آبخوان دشت شیراز با استفاده از مدل ریاضی و کد کامپیوتری MODFLOW"، دهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران.
- سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی، (۱۳۸۳) "فرونشست و پیامدهای نامطلوب آن در جهان و ایران"، مدیریت زمین شناسی مهندسی و زیست محیطی گروه زمین شناسی مهندسی، ص ۱۰.
- سعیدی فرغ، (۱۳۸۳)، پایان نامه ارشد: "مدل سازی هیدرولیکی آب زیرزمینی در دشت یاسوج و بررسی پخش و انتقال آلودگی در آن به کمک نرم افزار PMWIN"، دانشکده فنی - بخش عمران، دانشگاه شیراز.
- سوری س، لشکری پور غ.ر، احمدیان مقدم ر، رضانی ا، اصلانی ح، موسایی ف، (۱۳۸۸)، "بررسی افت سطح آب زیرزمینی و رابطه آن با آثار نشست زمین در دشت لردگان"، **سیزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران**، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، (۱۳۸۹) "بازنگری و تکمیل مطالعات طرحهای استفاده از فاضلابهای تصفیه شده شهر مشهد"، جلد دوم، مهندسیین مشاور سرو آب، مشهد، ص ۸۶
- شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، (۱۳۹۰) "بازنگری و تکمیل مطالعات بازچرخانی پساب تصفیه خانههای شهر مشهد"، جلد سوم، مهندسیین مشاور سرو آب، مشهد، ص ۵۱.
- شرکت آب منطقهای خراسان رضوی، (۱۳۸۶) "گزارش برنامه جامع تأمین آب شرب مشهد مقدس تا سال ۱۴۱۰"، کمیته تحقیقات کاربردی، مشهد، ص ۳۸.
- شرکت آب منطقهای خراسان رضوی، (۱۳۹۰) "گزارش نهایی بهنگام سازی تلفیق مطالعات منابع آب حوضه آبریز قره قوم" جلد سوم، مهندسیین مشاور طوس آب، مشهد، ص ۹۵.
- شمشکی، ا، محمدی، ی، بلورچی، م.ج، (۱۳۹۰) "شناسایی پهنه آبخوان تحت فشار و نقش آن در شکل گیری فرونشست زمین در دشت هشتگرد"، فصلنامه علوم زمین، جلد ۲۰، شماره ۷۹، ص ۱۴۲-۱۳۷.
- شهسواری، ع، (۱۳۸۲)، پایان نامه ارشد: "تهیه بیان آبی و مدل ریاضی آبخوان دشت عجب شیر با استفاده از MODFLOW و GIS"، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تبریز.
- صالحی، ر، غفوری، م، لشکری پور، غ.م، دهقانی، م، (۱۳۹۰)، "بررسی فرونشست دشت مهیار جنوبی و تأثیر شکافهای ناشی از آن بر زمینهای کشاورزی"، هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، شاهرود.
- صدقی، م.م. و چیت سازان، م، (۱۳۸۳)، "تعیین شرایط مرزی مناسب برای مدل جریان آبهای زیرزمینی دشت ارسنجان"، بیست و سومین گردهمایی علوم زمین، تهران.
- صدقی، م.م، (۱۳۸۴)، پایان نامه ارشد: "مدیریت منابع آب دشت ارسنجان با استفاده از مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- طاهری تیزرو، ع، زارع، م، الیاسی، م، (۱۳۹۰)، "مدل سازی جریان آب زیرزمینی در دشت کبودر آهنگ با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW"، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران.
- عسکری مارنانی، ص، چیت سازان، م، میرزایی، س.ی، نجاتی جهرمی، ز، (۱۳۸۸)، "تصحیح پارامترهای هیدرولیکی دشت فیروزآباد با استفاده از مدل سازی تفاضلات محدود در محیط GMS6.5"، سیزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران.

- عبادتی ن، (۱۳۸۹) "نشست زمین و کاهش سطح آب زیرزمینی در منطقه ایوانکی - گرمسار"، فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی و محیط زیست، شماره ۱۱، دوره ۴، ص ۸۷-۹۹.
- علیزاده ا، (۱۳۸۳) "گزارش بررسی استفاده از آبهای غیر متعارف (فاضلاب) در دشت مشهد" جلد سوم، شرکت آب منطقه‌ای خراسان، مشهد، ۱۸۲ ص.
- علیزاده ا، (۱۳۸۹) "اصول هیدرولوژی کاربردی" چاپ بیست و نهم، انتشارات دانشگاه امام رضا، مشهد، ۸۷۰ ص.
- فاطمی عقدا، س.م. نخعی، م. بیت الهی، ع. علیاری، ع.ر، (۱۳۸۰) "بررسی مکانیزم تشکیل فروچالهای دشت مرکزی همدان"، صفحات ۶۹۳-۷۰۱، مجموعه مقالات دومین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، جلد دوم، تهران.
- فتوت اسکندری آ، (۱۳۸۷)، پایان نامه ارشد: "مدل سازی ریاضی فرونشست دشت شهریار"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- قدرتی م، ثعبانی ع، (۱۳۹۱)، "مدل های ریاضی آبهای زیرزمینی آموزش کاربردی مدل GMS"، چاپ اول، انتشارات سیمای دانش، تهران، ۲۰۳ ص.
- کوهستان نجفی ح.م، (۱۳۷۹)، پایان نامه ارشد: "هیدروژئولوژی و شبیه سازی منابع آب زیرزمینی دشت زنجان با استفاده از مدل MODFLOW"، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- کیومرثی ک، (۱۳۸۱)، پایان نامه ارشد: "مدل بندی نشست زمین در اطراف یک چاه پمپاژ به کمک روش اجزاء محدود"، دانشکده فنی - بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- لشکری پور غ.ر، رستمی بارانی ح.ر، کهندل ا، ترشیزی ح، (۱۳۸۵) "افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین در دشت کاشمر"، صفحات ۲۴۲۸-۲۴۳۸، مجموعه مقالات دهمین همایش علوم زمین، تهران.
- لشکری پور غ.ر، غفوری م، سویزی ز و پیوندی ز، (۱۳۸۴) "افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین در دشت مشهد"، مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران، ص ۱۳۲-۱۲۴.
- لشکری پور غ.ر، غفوری م، کاظمی گلپان ر و دم شناس م، (۱۳۸۶b) "نشست زمین در اثر افت سطح آبهای زیرزمینی در دشت نیشابور"، پنجمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ص ۱۰۹۱-۱۰۸۲.
- لشکری پور غ.ر، غفوری م، مرادی ط، (۱۳۸۶c) "افت سطح آبهای زیرزمینی و بررسی نشست زمین در دشت اسد آباد"، صفحات ۱۳۴-۱۴۵، مجموعه مقالات یازدهمین همایش علوم زمین، مشهد.

- ملکی ر، کرمی غ.ج، دولتی ارده جانی ف، حسینی ح، اسدیان ف، (۱۳۹۰)، الف، "پیش بینی تأثیر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی شاهرود"، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران.
- مهدوی ق، (۱۳۹۰)، پایان نامه ارشد: "مطالعه بهینه بهره‌برداری از آبخوان دشت بزمان با استفاده از MODFLOW"، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- مؤسسه تحقیقات منابع آب، (۱۳۸۲)، "راهنمای تهیه مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی"، نشریه شماره ۳۳۷ - الف.
- محمدی ا. و کرمی غ.ج، (۱۳۸۶) "مدیریت آبخوان شیروان با استفاده از مدل PMWIN"، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین، تهران.
- مظفری زاده ج، (۱۳۸۵)، پایان نامه ارشد: "مدیریت بهینه منابع آب دشت گتوند با استفاده از مدل ریاضی تفاضلات محدود"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ناسوتی م، (۱۳۷۳) "نگاهی گذرا به منابع آب جهان و سهم ایران از آن"، فصلنامه آب و توسعه، وزارت نیرو، شماره ۲، دوره ۲: ص ۸۸.
- وثوق ع، باغوندا، ابطحی س.م، قلی زاده س.م، (۱۳۸۸)، "مدل ریاضی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی دشت مشهد"، نخستین کنفرانس سراسری آب‌های زیرزمینی، بهبهان.
- ولایتی س، (۱۳۸۵) "بررسی بحران آب استان خراسان"، فصلنامه مدرّس علوم انسانی، دوره ۱۰، شماره ۱، ص ۲۱۳-۲۳۴.

- References
- Abdulghani A. H. (2006) “Simulation And Prediction Of Groundwater Paths and Flow Vectors at Mosul City” **J. of Al-Rafidain Engineering**, **14**, pp **73-81**.
- Abidin H.Z., Andreas H., Djaja R., Darmawan D., Gamal M., (2008) “Land subsidence characteristics of Jakarta between 1997 and 2005, as estimated using GPS surveys” **GPS Solut.**, **12**, pp **23-32**.
- Berberian M. and King G.C.P. (1981) “Towards a Paleogeography and Tectonic evolution of Iran”.**Can. J. Earth sci.**, **18**, pp **210-265**.
- Berberian M., (1983) “Continental deformation in the Iranian Plateau contribution to the seismotectonics of Iran” **Geol.Surv.Iran**, **4**, **57**, pp **700**.
- Brambati A., Carbognin L., Quaia T., Teatini P. and Tosi L. (2003) “The Lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence” **Episodes**, **26**, **3**, pp **264-268**.
- El Idrysy H. and Smedt F.D (2006) “Modelling groundwater flow of Trifa aquifers, Morocco” **Hydrogeology Journal**, **14**, pp **1265-1276**.
- Feng Q.y., Liu G.j., Meng L., F E.j., Zhang H.r., Zhang K.f., (2008) “Land subsidence induced by groundwater extraction and building damage level assessment - a case study of Datun, China”**J.of C. Uni. Of Mining and Technology**, **18**, pp **556-560**.
- Fetter C.W. (1999), “**Contaminant Hydrgeology**”. Prentice Hall Inc. pp. **500**.
- Froukh L.J (2002), “Ground water modelling in aquifers with highly karstic and heterogeneous characteristics (KHC) in Palestine” **Water Resources Management**, **16**, pp **369-379**.
- Gambolati G., Gatto P. and Freeze R.A., (1974) “Mathematical simulation of the subsidence of Venice”, 2nd Results, **Water Resource. Res.**,**10**, **3**, pp **563-577**.
- German F.V. and Soki Y. (1984) “**Techniques for Prediction of Subsidence**”. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal.McGraw-Hil Book Company, New York, pp.**422**.

- Guerrero J., Francisco G., Pedro L., (2008) “Impact of halite dissolution subsidence on quaternary fluvial terrace development: Case study of the Huerva River, Ebro Basin, NE Spain” **J of Geomorfology**, **100**, pp **164-179**.
- Herzog, A. (2007). Transient groundwater modeling in Peri-Urban Kampala, Uganda. (Master Thesis), Department of Land and Water Resource Engineering, Sweden.
- Hill, M.C., & Tiedeman, C.R. (2007). Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty: Wiley and Sons, 464 p.
- Holdahl S.R. and Zilkoski D.B., (1991) “Subsidence at Houston, Texas, 1973-1987” **Proceeding of the Fourth International Symposium on Land Subsidence**, **200**, pp **3-14**.
- Lebbe L., (1995) “Land subsidence due to groundwater withdrawal from the semi-confined aquifers of southwestern Flanders ” **Land subsidence. Proc. International symposium**, **234**, pp **47-54**.
- Leighton A.D and Philips p.s., (2003) “Simulation of Ground-Water Flow and Land Subsidence, Antelope Vally Ground-Water Basin, California” **Water-Resources Investigations Report 03-4016**, pp **1-107**.
- Miller T.S., (2000) “Simulation Of Groundwater Flow In An Unconfined Sand and Gravel Aquifer At Marathon, Cortland County New York” U.S. Geological Survey, **Water-resources investigations report**, pp **0-4026**.
- Mylopoulos N., Mylopoulos Y., Veranis N., and Tolikas D (2007), “Groundwater modeling and management in a complex lake-aquifer system” **Water Resources Management**, **21**, pp **469-496**.
- Nairizi S. and Janparvar M. (2004) “Mashhad Plain Groundwater Management under Drought”. Condition. pp 22.
- Phien-Wej N., Giao P.H. and Nutalaya P., (2006) “Land subsidence in Bangkok” **Engineering Geology**, **82**, **4**, pp **187-201**.

- Poeter, E.P. and Hill, M.C. (1998). Documentation of UCODE, A Computer Code for Inverse Modeling, U.S. Geological Survey. **Water Resource Investigation Report**, pp **98-4080**.
- Poland J. F., (1981), PhD. Thesis, “The occurrence and control of land subsidence due to groundwater withdrawal with special reference to the San Joaquin and Santa Clara Valleys”, Stanford University, Palo Alto, California.
- Shaki A.A. and Adeloye A.J., (2007), “Mathematical Modelling Of Effects Of Irawan Irrigation Project Water Abstractions On The Murzuq Aquifer Systems In Libya” **J. of Arid Enviroment**, **71,2**, pp **133-156**.
- Shi X., Wu J., Ye Sh., Zhang Y., Xue Y., Wei Z., Li Q., Yu J., (2008) “Regional land subsidence simulation in Su-Xi-Chang area and Shanghai City, China” **Engineering Geology**, **100**, pp **27-42**.
- Sibson H.R., (1975) “Generation of Pseu dotachylyte by ancient seismic faulting”, **Geophys. J. R. Astr. S. C.** **43**, pp **775-794**.
- Sun H., Grandstaff D., Shagam R., (1999) “Land Subsidence due to groundwater withdrawal: potential damage of subsidence and sea level rise in southern New Jersey, USA” **Environmental Geology**, **37, 4**, pp **290-296**.
- Waltham A. (1989), "**Ground Subsidence**". Blackie Academic and Professional, pp **202**.
- Todd W.R. and Kenneth R.B. (2001) “Delineation of Capture Zone for Municipal Wells in Fractured Dolomite. Sturgeon By, Wisconsin” **USA. Hydrogeology Journal**. **9**, pp **432-450**.
- Wang S., Shao J., Song X., Zhang Y., Huo Z., and Zhou X. (2007) “Application of modflow and geographic information system to groundwater flow simulation in north Chain Plain”, **Environ Geol**, pp **1449-1462**.
- Wels C. and Findlater L. (2009) “Groundwater modeling as tool for closure planning: pridiction of zinc transport for alternative cover scenarios” **Robertson Geo Consultants Inc**, **61**, pp **90 - 94**.



- Yang Q., Lu W., and Fang Y. (2011) “Numerical modeling of three dimension groundwater flow in tongliao, China” **Procedia Engineering** , pp 638-642.
- Yaouti F. El., Mandour A. El., Khattach D. and Kaufmann O., (2008) “Modelling Groundwater Flow And Advective Contaminant Transport In The Bou-Areg Unconfined Aquifer (NE Morocco)” **J. of Hydro-environment Research**, 2, I. 3, pp **192-209**.
- Yidana S.M., Ganyaglo S., Banoeng-Yakubo B., Akabzaa T. (2011) “A conceptual framework of groundwater flow in some crystalline rock aquifers in southeastern Ghana” **Journal of African Earth Sciences**, **59**, pp **185-194**.
- Zuquette L.V., Palma J.B., Pejon O.J (2005) “Environmental assessment of an uncontrolled sanitary landfill, Pocos de Caldas, Brazil” **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, **64** ,3 pp. **257-271**.

## **Abstract**

Mashhad, with an area of over 200 square kilometers is located in the center of the Kashafrud Basin in Mashhad plain. Due to the limited water resources and the excessive exploitation from the aquifer, groundwater level is steadily declining in the plain and The average annual decline in the plain is about 1.03 m. The fundamental aim of this research is preparing the mathematical model of Mashhad. aquifer with the purpose of predicting the behaviour of the aquifer for different conditions (such as the effect of waste water collection project subsidence). For gaining to this aim, GMS computer code MODFLOW and with conceptual model approach were applied. After collecting the required data including pumping test data, driller's logs, water level data and geophysical data, the conceptual model of the plain was constructed. The developed model was calibrated in steady state (October 2008) and transient state (November 2008 to October 2009) using water table data of 17 piezometric boreholes. Parameters K and S are the most important parameters that optimize in these stages Based on the obtained results, average values of K is 1 to 16 m/d and values of S varies between 0.25 and 0.00001. The sensitivity analysis was examined for the change of different parameters. The obtained results reveals that the most sensitivity of the model is related to the values of hydraulic conductivity. Based on the results obtained during the verification stage (November 2009 – October 2010) the accuracy of the model was confirmed. Finally, the verified model was used for predicating the future condition of aquifer for scenario development and its impact on groundwater levels in the wastewater collection network used and the results were evaluated.

The obtained results from applying the model indicate that waste water collection project may decrease the recharge of the aquifer such that in the end of project the average annual decline will reach to 16 meter. Due to soil texture of mashhad city and the thickness of aquifer, the values of subsidence rates in supercritical condition varies from 50 cm to maximum 250 cm in Mashhad city. This project will expand our ability to manage for stabilizing the rate of exploitation and management for construction standards increase.

Keywords: Collection wastewater, groundwater modeling, GMS, land subsidence