دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته عمران -گرایش مدیریت منابع آب

عنوان :

مدیریت منابع آب زیرزمینی دشت جنوب غربی تهران بر اساس مدل سازی فرونشست

استاد راهنما :

دکتر مرتضی موسوی

استاد مشاور:

مهندس محمد جواد بلورچی

نگارش:

علی تردست

اسفند ماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیر و تشکر

اینک که به مدد الهی موفق به پایان رساندن دوره تحصیلی شده ام برخود لازم می دانم که امتنان قلبی و مراتب سپاسگزاری خود را از تمامی عزیزان و بزرگوارانی که در این راه یاریم نمودند ابراز نمایم.

از زحمات و تلاش های استاد ارجمندم جناب آقای دکتر مرتضی موسوی که به عنوان استاد راهنما در تمام مراحل انجام این پایان نامه، مرا از راهنمائی های علمی، عملی و اخلاقی خود بهره مند ساخته اند، صمیمانه تشکر می نمایم.

از زحمات و تلاش های جناب آقای مهندس محمد جواد بلورچی که بعنوان استاد مشاور در تمام مراحل انجام پایان نامه همواره راهنمای اینجانب بوده اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می کنم.

از اساتید گرامی، جناب آقای دکتر شمسایی و جناب آقای دکتر بهادری که به عنوان اساتید داور زحمت بازخوانی و ویرایش علمی این پایان نامه را برعهده داشته اند و راهنمائی های ارزنده ای ارائه نموده اند، همچنین از زحمات و راهنمائی های ارزنده‌ی جناب آقای مهندس شمشکی و کلیه استادان گرامی و عزیزان دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، و همه‌ی دوستان عزیزی که در همه ی مراحل، صمیمانه اینجانب را یاری کردند، نهایت قدردانی را دارم.

از عوامل اداره کل امور آب استان تهران و بخش امور مطالعات جهت قراردادن اطلاعات مربوط به چاههای آب ناحیه ی مورد مطالعه صمیمانه تشکر می کنم.

از امور آب استان ایلام نیز که نهایت مساعدت و حمایت خود را انجام دادند صمیمانه سپاسگزارم.

بی تردید ورود به این دوره و اتمام آن را مدیون زحمات و حمایت های بی دریغ پدر و مادر بزرگوارم و مهربانیهای همسرم هستم و کمال تشکر و قدردانی خود را از آنها ابراز می دارم.

همچنین لازم می دانم از تمامی عزیزانی که در مراحل مختلف این تحقیق مرا یاری نموده اند، سپاسگزاری نمایم.

تقدیم به

پدر و مادر بزرگوارم که اسوه تلاش، فداکاری و مهربانی اند

و تقدیم به

همسر عزیزم

که در تمامی مراحل تحصیلم مرا یاری و همراهی نمود.

چکیده:

در عصر کنونی، منابع آب به عنوان نیاز اولیه تمدن بشری از حساسیت ویژه ای برخوردار است و مطالعه منابع آب از جمله منابع آب زیرزمینی، و مدیریت مصرف آن به دلیل کمبود منابع مذکور، اهمیت ویژه ای دارد. در این راستا به کار گیری شیوه های ریاضی و استفاده از مدل های بهینه مدیریت مصرف منابع آب زیرزمینی تا حد زیادی می توانند موثر واقع گردند.

جنوب غرب دشت تهران شامل مناطق مسکونی و زمین های زراعی و مناطق صنعتی مختلف است این منطقه شامل محدوده ای از مناطق ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ شهرداری تهران می باشد. از نظر اقلیمی خشکو سرد می باشد.

در رابطه با فرونشست در مناطق مختلفی مثل میدان نفتی گوس کریک در ایالت داکوتای آمریکا توسط دکتر او. ای. ماینزر و در شانگ های توسط شی لوکسیان و بائو منگفانگ و در ونیز ایتالیا توسط لوراکاربنین و همکاران .... بررسی هایی به عمل آمده است و به این نتیجه رسیده اند که در این مناطق به دلیل مصرف بی رویه آب از منابع زیرزمینی و برداشت از بعضی از معادن مثل فسفات در سطح زمین فرونشست ایجاد شده است و سپس با کاهش پمپاژ آب و یا تزریق آب در مناطق مناسب از فرونشست زمین جلوگیری کرده اند.

در سال های اخیر با توجه به وقوع خشکسالی های مداوم، ارزیابی هیدروژئولوژیکی و مدیریت آبخوان در بیشتر نواحی کشور ما از جمله در ناحیه ی مورد مطالعه امری اجتناب ناپذیر است. لذا برای دست یافتن به این هدف در این تحقیق با استفاده از نتایج حاصل از آزمون پمپاژ، لوگ زمین شناسی و هیدروگراف چاه های مشاهده ای، نقشه های زمین شناسی، بررسی های ژئوالکتریک و بازدیدهای صحرایی، ارزیابی هیدروژئولوژیکی دشت انجام گرفت. سپس با استفاده از اطلاعات موجود، مدل آبخوان دشت جنوب غربی تهران تهیه گردید. همچنین مهرماه سال ۱۳۸۲ به عنوان زمان حاکم بودن شرایط ناماندگار بر آبخوان مشخص گردید. سپس با تهیه مدل مفهومی آبخوان و فایل های ورودی به مدل کامپیوتری، واسنجی مدل با نرم افزار (PMWIN Pro ۷)

Proceessing Modflow for Windows برای شرایط ناماندگار به منظور بهینه نمودن مقادیر پارامتر های هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره صورت گرفت. واسنجی مدل به مدت ۷سال از مهرماه سال ۱۳۸۲ لغایت مهرماه ۱۳۸۸ و صحت سنجی آن نیز به مدت یک سال از مهرماه ۱۳۸۸ الی مهرماه ۱۳۸۹ انجام شد. نتایج حاصله توانایی مدل ساخته شده را برای انجام کارهای مدیریتی تأیید کرد و با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف، تأثیر برداشت چاه ها در مناطق مختلف دشت برای سالهای آتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول (مقدمه)

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- فرونشست زمین ۳
۱-۳- مکانیزم فرونشست ۴
۱-۳-۱- فرونشست در اثر استخراج بی‌رویه آب های زیرزمینی ۴
۱-۳-۲- فرونشست در اثر انحلال املاح ۴
۱-۳-۳- فرونشست در اثر عوامل تکتونیکی ۷
۱-۴- عوارض فرونشست ۸
۱-۵- هدف از مطالعات آب زیرزمینی ۱۰
۱-۶- هدف از انجام تحقیق حاضر ۱۲
۱-۷- ساختار پایان نامه ۱۳

فصل دوم (مروری بر تحقیقات انجام شده)

۲-۱- بحران فرو نشست زمین در جهان ۱۵
۲-۱-۱- مقدمه ۱۵
۲-۱-۲- تاریخچه بحران فرونشست در جهان ۱۵
۲-۲- بحران فرونشست زمین در ایران ۲۲
۲-۲-۱- تاریخچه مطالعه فرونشست در کشور ۲۲

فصل سوم (وضعیت عمومی منطقهٔ مورد مطالعه)

۳-۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی ۲۷
۳-۲- هواشناسی و اقلیم ۲۸
۳-۲-۱- دما ۲۸
۳-۲-۲- تبخیر ۲۸
۳-۲-۳- رطوبت نسبی ۲۹
۳-۲-۴- باد ۲۹
۳-۲-۵- بارندگی ۲۹

۳-۲-۶- آبهای سطحی ۳۰
۳-۳- طبقه بندی اقلیمی ۳۰
۳-۴- زمین شناسی منطقه ۳۱
۳-۵- ویژگی های سفره آب زیرزمینی ۳۲
۳-۶- آب زیرزمینی ۳۳
۳-۶-۱- مواد تشکیل دهنده دشت ۳۳
۳-۶-۲- ضرایب هیدرودینامیکی ۳۵
۳-۶-۳- منابع آب زیرزمینی ۳۶
۳-۶-۴- هیدروگراف واحد آبخوان ۳۹
۳-۶-۵- نقشه هم عمق سطح آب زیرزمینی ۴۰
۳-۶-۶- نقشه منحنی های هم تراز آب زیرزمینی ۴۱
۳-۷- بیلان آب زیرزمینی ۴۲
۳-۷-۱- محدوده و دوره بیلان ۴۳
۳-۷-۲- بیلان ده ساله (سال های آبی ۷۴-۱۳۷۳ تا ۸۳- ۱۳۸۲) ۴۴
۳-۸- مطالعات اکتشافی ۴۵
۳-۸-۱- ژئوفیزیک ۴۵
۳-۸-۲- تغییرات ضخامت آبرفت ۴۶
۳-۸-۳- تغییرات ارتفاع سنگ کف ۴۸

فصل چهارم (مدل)

۴-۱- مقدمه ۵۱
۴-۲- انواع مدل های آب زیرزمینی ۵۱
۴-۲-۱- مدل های تحلیلی ۵۲
۴-۲-۲- مدل های عددی ۵۳
۴-۳- روش تفاضلهای محدود ۵۵
۴-۴- روش اجزاء محدود ۵۶
۴-۵- روند مدل سازی آب زیرزمینی ۵۷
۴-۵-۱- انتخاب معادله حاکم و برنامه کامپیوتری ۵۷
۴-۶- معرفی نرم افزار PMWIN ۵۹
۴-۷- طراحی و ساخت مدل جنوب غرب دشت تهران ۶۱
۴-۷-۱- مدل مفهومی ۶۱

۴-۷-۲- تهیه شبکه مدل و گسسته سازی مکانی ۶۲
۴-۷-۳- نوع و تعداد لایه ها ۶۴
۴-۷-۴- بخش فوقانی لایه ها ۶۴
۴-۷-۵- تعیین مرز زیرین آبخوان ۶۵
۴-۷-۶- شرایط مرزی ۶۶
۴-۷-۷- گسسته سازی زمانی مدل ۶۷
۴-۷-۸- بار هیدرولیکی اولیه ۶۷
۴-۷-۹- قابلیت انتقال آب ۶۸
۴-۷-۱۰- هدایت هیدرولیکی ۶۹
۴-۷-۱۱- ضریب ذخیره ۶۹
۴-۸- مولفه های هیدرولوژیکی آبخوان ۷۱
۴-۸-۱- برداشت آب از آبخوان ۷۱
۴-۸-۲- تخلیه ناشی از تبخیر از سطح آب زیرزمینی ۷۴
۴-۸-۳- تخلیه و تغذیه ناشی از جریان ورودی و خروجی آب زیرزمینی ۷۴
۴-۸-۴- نفوذ آب باران ۷۵
۴-۸-۵- تغذیه از طریق آب برگشتی کشاورزی، شرب و صنعت ۷۵
۴-۹- اجرای مدل ۷۵
۴-۱۰- واسنجی (کالیبراسیون) مدل ۷۶
۴-۱۱- آنالیز حساسیت ۷۷
۴-۱۲- صحت سنجی مدل ۷۸
۴-۱۳- مدل سازی فرونشست زمین در نتیجه ی افت سطح آب زیرزمینی ۷۹
۴-۱۴- فرونشست زمین در دشت جنوب غربی تهران ۸۱

فصل پنجم (مدیریت منابع آب زیرزمینی، نتیجه گیری و پیشنهادها برای ادامه کار)

۵-۱- مدیریت منابع آب زیرزمینی ۸۶
۵-۲- پیش بینی مدل ۸۷
۵-۲-۱- ادامه روند کنونی بهره برداری از آبخوان ۸۷
۵-۲-۲- پیش بینی وضعیت آبخوان در شرایط ۵۰ درصد کاهش پمپاژ ۸۸
۵-۳- نتایج حاصل از مدل سازی آب زیرزمینی و فرونشست ۹۰
۵-۴- پیشنهادها برای ادامه کار ۹۲
۶-۱- منابع و مراجع ۹۵

فهرست شکلها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱-۱- نحوه تشکیل غار در اثر انحلال املاح ۵

شکل ۱-۱-۲- نحوه تشکیل فروچاله ۷

شکل ۱-۱-۳- بالا آمدن لوله جدار چاه ها در مزارع رفسنجان ۹

شکل ۱-۱-۴- ایجاد ترک در سطح زمین ۱۰

شکل ۲-۱-۱- ترک ناشی از فرونشست آریزونا در ایالات متحده ۱۷

شکل ۳-۱-۱- نقشه موقعیت محدوده فرونشست در جنوب غرب دشت تهران ۲۷

شکل ۳-۱-۲- لوگ گمانه های صباشهر و عوارضی جاده ساوه ۳۴

شکل ۳-۱-۳- نقشه منحنی های ((هم قابلیت انتقال)) محدوده فرونشست زمین ۳۵

شکل ۳-۱-۴- موقعیت چاههای بهره برداری محدوده فرونشست دشت تهران ۳۸

شکل ۳-۱-۵- موقعیت مادر چاه قنات های محدوده فرونشست دشت تهران..... ۳۸

شکل ۳-۱-۶- نقشه تیسن آبخوان در محدوده فرونشست جنوب غرب دشت تهران..... ۳۹

شکل ۳-۱-۷- هیدروگراف واحد آبخوان در محدوده فرونشست جنوب غرب دشت تهران ۴۰

شکل ۳-۱-۸- نقشه منحنی های ((هم عمق)) سطح آب زیرزمینی ۴۱

شکل ۳-۱-۹- نقشه منحنی های ((هم تراز)) سطح آب زیرزمینی ۴۲

شکل ۳-۱-۱۰- نقشه مقاطع ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی محدوده ۴۴

شکل ۳-۱-۱۱- نقشه ضخامت آبرفت محدوده جنوب غربی دشت تهران ۴۷

شکل ۳-۱-۱۲- نقشه تراز سنگ کف جنوب غربی دشت تهران ۴۹

شکل ۴-۱-۱- نشان دادن لایه بندی در شبکه بندی ۵۴

شکل ۴-۱-۲- شبکه بندی ها ۵۶

شکل ۴-۱-۳- مراحل مدل سازی ۵۸
شکل ۴-۱-۴- شبکه بندی کلی مدل دشت جنوب غربی تهران ۶۳
شکل ۴-۱-۵- نمودار « هم مقدار» توپوگرافی دشت تهران ۶۵
شکل ۴-۱-۶- نمودار « هم مقدار» سنگ کف دشت تهران ۶۶
شکل ۴-۱-۷- شکل بار هیدرولیکی اولیه دشت تهران ۶۸
شکل ۴-۱-۸- نقشه ضریب ذخیره آب در دشت تهران ۷۰
شکل ۴-۱-۹- پراکنش چاه های بهر برداری در دشت تهران ۷۲
شکل ۴-۱-۱۰- پراکنش چاه ها در دشت تهران پس از حذف چاههای خارج از محدودهٔ مدل..... ۷۳
شکل ۴-۱-۱۱- مقادیر بار هیدرولیکی صحت سنجی شده ۷۸
شکل ۴-۱-۱۲- نقشه اولیه فرونشست دشت تهران قبل از واسنجی ۸۳
شکل ۴-۱-۱۳- نقشه مقادیر محاسباتی فرونشست زمین در دشت تهران در سال ۱۳۸۴..... ۸۳
شکل ۴-۱-۱۴- نقشه مقادیر مشاهداتی فرونشست زمین در دشت تهران در سال ۱۳۸۴ ..... ۸۴
شکل ۵-۱-۱- نقشه پیش بینی فرونشست زمین در دشت تهران در سال ۱۳۹۳ ..... ۸۸
شکل ۵-۱-۲- ناحیه ی بحرانی محدوده فرونشست ۸۹
شکل ۵-۱-۳- نقشه کاهش فرونشست در صورت ۵۰ درصد کاهش پمپاژ ۸۹

فهرست جدولها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱-۱- تخلیه سالانه آب زیرزمینی توسط انواع چاه های بهره برداری ۳۷

جدول ۳-۱-۲- خلاصه محاسبات مربوط به بیلان ده ساله در ناحیه ی فرونشست..... ۴۳

جدول ۴-۱-۱- مقادیر معمول ضریب ذخیره برای خاک های مختلف ۷۰

جدول ۴-۱-۲- مقادیر معمول ضریب فشردگی برای خاک های مختلف ۸۲

جدول ۵-۱-۱- مقایسه میزان تخلیه چاهها و قناتها در سالهای مختلف آماربرداری ۹۱

فصل اول

مقـدمـــه

۱-۱- مقدمه

با توجه به اینکه علت اصلی فرونشست سطح زمین، افت سطح آب زیرزمینی می باشد لازم است، با مدیریت بهینه منابع آب، موازنه ای بین ورود و خروج آب زیرزمینی به سفره آب زیرزمینی منطقه برقرار گردد. مدیریت بهینه منابع آب، نیازمند اطلاعاتی در رابطه با کمیت و کیفیت آب موجود و تبادلات آن در قسمت های مختلف طبیعت است. در کشور ما از یک طرف به دلیل محدودیت منابع آب، و از طرف دیگر به دلیل روند افزایش جمعیت و توسعه کشاورزی و صنعتی و رشد سریع تقاضای آب، و از سوی دیگر به دلیل گسترش عوامل آلاینده و تهدید روز افزون این منابع، مدیریت بهینه منابع آب از اهمیت بیشتری برخوردار است.

با توجه به استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در کشور، متأسفانه روز به روز استانهای بیشتری دچار فرونشست زمین شده یا در معرض خطر فرونشست زمین قرار می گیرند، از جمله استانهای کرمان، خراسان، یزد، اصفهان، خوزستان، تهران، و حتی آذربایجان و کردستان. این فرونشست، متأسفانه باعث خساراتی در این مناطق شده و خواهد شد.

از جمله خساراتی که در نتیجه فرونشست ایجاد می شود، ترک خوردگی ساختمانها، آسیب به زمینهای کشاورزی، تخریب پلها، جاده ها، سازه های آبی و... می باشد. به طور مثال، فرونشست

زمین در دره سنترال[1] کالیفرنیا از یک سو موجب آسیب رسیدن به ساختمان ها، آبروها، جداره رودها، پل ها و بزرگراهها شده و از دیگر سو موجب جاری شدن سیل در منطقه گشته و میلیونها دلار خسارت وارد کرده است[۴۳،۴۴]. از دیگر خسارات مهم فرونشست سطح زمین در اثر افت سطح آب های زیرزمینی، این است که افت سطح ایستابی باعث بیابان زایی و گسترش بیابان در منطقه شده و خسارات جبران ناپذیری وارد می کند.

مسلّماً در طبیعت تمامی شرایط دست به دست هم می دهند تا فرآیندی صورت بگیرد. در پدیده فرونشست سطح زمین، افت سطح آب های زیرزمینی، وجود رس در منطقه و سپس فشردگی لایه‌های آبدار، همگی در فرونشست سطح زمین مؤثرند. در مناطقی که فرونشست صورت می گیرد همه این عوامل یا تعدادی از آنها دخالت دارند.

از اهدافی که در مهار فرونشست هر منطقه مورد نظر است جلوگیری از وارد شدن خسارات مالی و جانی و مدیریت صحیح بهره برداری منابع آبی و تنظیم میزان بهره برداری است. با استفاده از مدل PMWIN، سعی می شود رابطه ای بین میزان برداشت آب و میزان فرونشست سطح زمین به دست آید.

در این تحقیق سعی بر آن است که فرونشست سطح زمین در منطقه ((جنوب غربی تهران)) بررسی شود و نحوه مدیریت صحیح عامل اصلی آن که بهره برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی است پیشنهاد شود.

۱-۲- فرونشست زمین[2]

فرونشست زمین عبارت است از افت سطح زمین در اثر فرو ریختن ناگهانی[3] و تراکم رسوبات نزدیک سطح زمین. فرونشست زمین می تواند در اثر پدیده های طبیعی زمین شناختی مانند

[1] Central Valley
[2] Land Subsidence
[3] Collapse

انحلال املاح، آب شدگی یخ ها و تراکم نهشته ها، حرکات آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته جامد زمین و یا فعالیت های انسانی نظیر معدنکاری، برداشت آب های زیرزمینی یا نفت و گاز ایجاد شود.

۱-۳- مکانیزم فرونشست

۱-۳-۱- فرونشست در اثر استخراج بی رویه آب های زیرزمینی

اصل تنش موثر به خوبی بیان کنندهٔ رابطهٔ بین استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی و فرونشست می-باشد. این اصل توسط ترزاقی در سال ۱۹۲۵ بر اساس تئوری تحکیم یک بعدی چنین تعریف شد:

$$\sigma' = \sigma_t - P_p \qquad ۱-۱-۱$$

که در آن:

σ' تنش موثر، σ_t تنش کل و p_p فشار آب حفره‌ای است. زمانی که برداشت بی‌رویه آب از سفره انجام می‌گیرد و بار پیزومتریک افت می‌کند، فشار منفذی آب کاهش و به دلیل ثابت بودن تنش کل، تنش مؤثر افزایش می‌یابد. افزایش تنش مؤثر، موجب تراکم خاک و در نتیجه فرونشست زمین می‌شود.

فرونشست شدید ناشی از استخراج بی‌رویه آب های زیرزمینی تنها در جاهایی اتفاق می افتد که رسوبات رسی ضخیمی وجود داشته یا در بین لایه های آبدار، لایه های سیلت و رس قرار گرفته باشد، زیرا قابلیت تراکم رسوبات ریزدانه خیلی بیشتر از ماسه ها و سنگریزه هاست و عملاً فرونشست در اثر تراکم آنها ایجاد می شود.

۱-۳-۲- فرونشست در اثر انحلال املاح

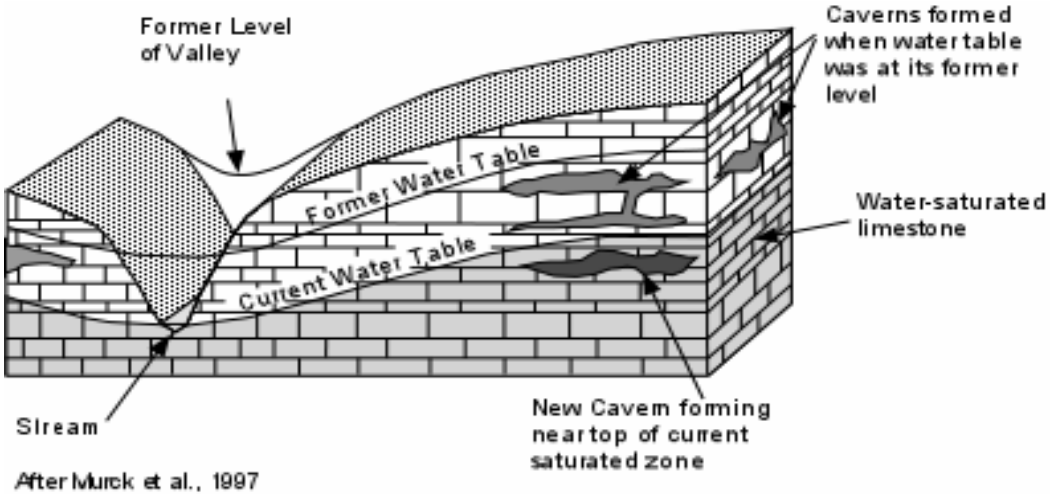
رویداد فرونشست به طور معمول در دو محیط مختلف امکان پذیر است:

۱- نهشته های جوان تحکیم نیافته و رسوبات آواری نیمه تحکیم یافته با تخلخل بالا که در زیر نهشته های آبرفتی، دریاچه ای و یا نهشته های دریایی کم عمق واقع شده اند. به طور معمول چنین محیط هایی با نفوذپذیری بالا و تراکم پذیری پایین تحت تنش قرار می گیرند.

۲- سنگهای انحلال پذیر (سنگ آهک، دولومیت، گچ و نمک) که توسط نهشته های تحکیم نیافته مدفون شده اند، یا فروچاله های کهن پرشده با نهشته های تحکیم نیافته که فشار هیدرواستاتیکی رو به بالای آب زیرزمینی در نگهداری آنها موثر است که از جمله آن ها می-توان به غارها[1] و فروچاله ها اشاره کرد.

الف) غارها و تشکیل آنها

غارها فضاهای باز و بزرگ زیرزمینی هستند که اگر این فضاهای باز به هم بپیوندند Cavern نامیده می شوند. اغلب غارها در اثر فرآیند انحلال شیمیائی ناشی از جریان آب زیرزمینی (به عنوان مثال انحلال کربنات ها) تشکیل می شوند. فرآیند انحلال با شکستگی سنگ ها شروع می شود و با عریض تر شدن و به هم پیوستن این شکافها یک غار تشکیل می گردد (شکل ۱-۱-۱).



شکل ۱-۱-۱- نحوه تشکیل غار در اثر انحلال املاح [۱۸]

[1] Caves

انحلال کربنات ها یکی از عوامل مهم تشکیل غارها می باشد. سنگ های کربناته مانند سنگ آهک، بیشتر از کلسیت $CaCo_3$ تشکیل شده اند که طی فرآیند هوازدگی شیمیائی مستعد انحلال توسط آب زیرزمینی می باشند. نتیجه این انحلال، تشکیل غارها، فروچاله ها و نهایتاً توپوگرافی کارستی است.

آب موجود در اتمسفرمقدار کمی از دی اکسید کربن را در خودش حل می کند. بنابراین آب باران شامل مقداری اسیدکربنیک است. موقعی که آب باران در سیستم آب زیرزمینی نفوذ می کند و در مسیر جریان با سنگ های کربناته مثل سنگ آهک برخورد می کند، طی واکنش (۱-۱-۱) کلسیت موجود در سنگ آهک حل می شود:

$$CaCo_3+H_2Co_3 \rightarrow Ca^{+2}+2HCo_3^{-2} \qquad ۲-۱-۱$$

کلسیت با اسید کربنیک واکنش انجام می دهد و یون کلسیم و یون بیکربنات تولید می شوند. این واکنش با عبور آب از درز و شکاف سنگ ها اتفاق می افتد. اگر این واکنش در یک دوره زمانی طولانی اتفاق بیفتد مقدار زیادی از سنگ آهک را حل می کند.

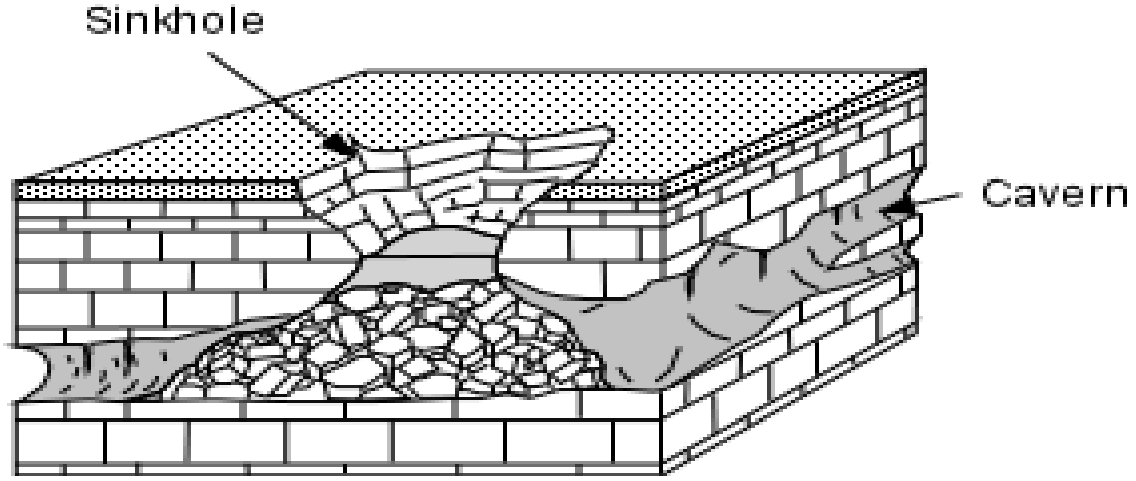
ب) فروچاله ها

فروچاله یک محدوده انحلالی بزرگ می باشد که به طرف سطح زمین باز شده باشد. برخی از فروچاله ها در نتیجه فروریختن سقف غارها تشکیل می شوند . فروچاله ها می توانند از انحلال سنگهای موجود در سطح زمین نیز به وجود آیند (شکل ۱-۱-۲).

فروچاله ها معمولاً در اراضی قرار گرفته بر روی سنگ آهک تشکیل می شوند. برای مثال در فلوریدای مرکزی در یک سطح کوچک ۲۵ کیلومتر مربعی، بیش از ۱۰۰۰ فروچاله در اثر فروریختگی طی چند سال اخیر تشکیل شده است [۳۸].

فروچاله ها ممکن است در نتیجه پایین رفتن تراز آب زیرزمینی در اثر پمپاژ بیش از ظرفیت سفره تشکیل شوند. ظاهراً تشکیل فروچاله ها در فلوریدا به همین علت می باشد.

اغلب غارها در نزدیکی تراز سطح آب زیرزمینی تشکیل می شوند؛ بنابراین این فضاهای باز در ابتدا از آب پر بوده اند. زمانی که تراز سطح آب بالاست، آب موجود در غارها به حفاظت سقف آن کمک می کند. زمان پائین رفتن تراز آب، سقف غار ناپایدار شده و با فرو ریختن آن، فروچاله ها تشکیل می شوند.



شکل ۱-۱-۲- نحوه تشکیل فروچاله [۱۸]

اگر فروچاله ها طوری فرو بریزند که آب زیرزمینی در تراز سطح زمین قرار بگیرد، فروچاله با آب پر شده و یک دریاچه کوچک تشکیل می شود.

گرچه فروچاله ها معمولاً در اراضی واقع بر روی سنگ آهک تشکیل می شوند، در مناطقی نیز که سنگ های با قابلیت انحلال بالا در نزدیکی سطح زمین وجود داشته باشند، فروچاله ها می توانند تشکیل شوند. این سنگها شامل سنگ نمک هستند که از نمک طعام غیر آلی[1] و نهشته های گچی تشکیل یافته و هر دوی آنها به راحتی در آب زیرزمینی حل می شوند.

۱-۳-۳- فرونشست در اثر عوامل تکتونیکی

عوامل تکتونیکی: فعال شدن گسلها و زلزله و ... نیز از عواملی است که در کنار ((استخراج بی‌رویه آبهای زیرزمینی)) و ((انحلال املاح)) موجب فرونشست زمین می شود.

[1] Inorganic halite