صص ۶۰-۴۷

بررسی خطر وقوع فرو چاله‌ها در آبخوان‌های جنوب استان اصفهان با تاکید بر نقاط کارستی

شیلا حجه فروش نیا*

استادیار ژئومورفولوژی، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

مسعود برهانی

استادیار مرتعداری، مرکز تحقیقات و آموزش ترویج کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۲۷

چکیده

افزایش تقاضای آب جهت مصارف کشاورزی، شرب و صنعت در دهه‌های اخیر حفر چاه‌های آب را به دنبال داشته که در موارد زیادی این حفاری‌ها بدون مجوز بوده است. این برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی استان اصفهان به همراه کاهش نزولات جوی، آسیب‌های جبران ناپذیری را به منابع آب استان تحمیل و دشت‌های آن را با خطر فرونشست و فرو چاله مواجه کرده است. شهرستان سمیرم در جنوب استان، یکی از مناطق تحت تأثیر برداشت‌های بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی است. در این پژوهش با ایجاد پروفیل‌های خاک در قسمت‌های مختلف منطقه، شناسایی محیط‌های کارستی، بررسی ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و شناسایی چاه‌های مجاز و غیرمجاز، افت سطح آب‌های زیرزمینی بررسی و نقشه پهنه‌بندی خطر ایجاد فرو چاله توسط مدل فازی تهیه گردید. نتایج حاصل از نقشه‌های خروجی بیشترین احتمال وقوع پدیده فرو چاله را مربوط به منطقه کمه واقع در بخش پادنا در جنوب غربی شهرستان سمیرم در فاصله ۶۵ کیلومتری از مرکز شهرستان نشان می‌دهد. نقشه پهنه‌بندی خطر فرو چاله بیانگر آن است که ۱۳/۲ درصد از مساحت در پهنه ریسک خیلی زیاد، ۵۶/۹ درصد ریسک زیاد، ۱۶/۵۱ درصد ریسک متوسط و ۱۳/۲ درصد ریسک کم را به خود اختصاص داده است. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل هیدرو گراف و تغییرات به وجود آمده در حجم ذخیره آبی آبخوان‌ها و شواهد آن نشان داد که کاهش تغییرات حجم آبخوان‌ها در شهرستان سمیرم به‌طور متوسط سالانه ۵/۱۰ میلیون مترمکعب است.

واژگان کلیدی: آبخوان، شهرستان سمیرم ، فرو چاله، فازی، کارست، کریجینگ

مقدمه

افزایش جمعیت و بهره‌برداری روزافزون از منابع آب زیرزمینی، تبعات جبران‌ناپذیری به دنبال دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها پدیده فرونشست زمین است. فرونشست عبارت است از فروریزش یا نشست سطح زمین که به علت‌های متفاوتی در مقیاس بزرگ روی می‌دهد. به‌طور معمول این اصطلاح به حرکت قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار

* نویسنده مسئول: **sh.hajehforoshnia@areeo.ac.ir**

اندک افقی همراه باشد، گفته می‌شود. فرونشست، عمدتاً در حوضه‌هایی با نهشته‌های آبرفتی، اتفاق می‌افتد و منجر به نشست و یا فرو ریزش سطح زمین می‌گردد (آمیغ پی و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۶۴). عوامل مختلفی می‌تواند موجب این پدیده گردد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از پدیده‌های طبیعی زمین‌شناختی مانند انحلال، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته جامد زمین و یا فعالیت‌های انسانی نظیر معدن کاری و برداشت آب‌های زیرزمینی و یا نفت. یکی از دلایل فرونشست برداشت آب زیرزمینی بیش از توان طبیعی آبخوان است و هرگونه افزایش یا کاهش برداشت آب زیرزمینی باعث نوسانات عمق آب زیرزمینی و احتمال فرونشست می‌شود. به همین دلیل تغییرات عمق آب زیرزمینی برای بررسی نشست زمین از اهمیت زیادی برخوردار است. عوامل متعددی در کنترل عمق سطح آب زیرزمینی دخیل هستند. میزان تغذیه، شرایط تغذیه، توپوگرافی، سطح زمین، موانع هیدرولیکی، موقعیت زهکش‌ها، چشمه‌ها و ... ، از مهم‌ترین عوامل کنترل کنندهٔ عمق آب زیرزمینی می‌باشند. تعیین عمق آب زیرزمینی برای توسعهٔ بهره برداری، محاسبه تبخیر از آب زیرزمینی، بررسی کیفیت آن و شناسایی عامل‌های شوری، مطالعات فرونشست و کشاورزی بسیار مهم است (فرامکین[1]، ۱۰۴:۲۰۱۱).

فرو چاله‌ها از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی، فرورفتگی سطح زمین در اشکال بیضی و کروی دارای دیواره‌های با شیب تند در ابعاد به‌طور متوسط سه تا ده‌ها متر است که در اثر گسیختگی لایه‌های سطحی ایجاد می‌شود. بیشتر فرو چاله‌ها در سنگ‌های کربناتِ (آهک و سنگ گچ) شکل می‌گیرند. فرو چاله‌ها می‌توانند باعث تخریب سیستم‌های آبیاری و خاک‌های حاصلخیز کشاورزی (با پایین آوردن میزان تخلخل آن‌ها) گردد (اوه[2]، ۲۰۱۰: ۳۷). پدیده فرو چاله با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه، می‌تواند سبب بروز تغییرات چشمگیری در هیدرولوژی منطقه نیز شود. به‌عنوان مثال در این مناطق ممکن است سیلاب‌های عظیم و مخربی به وقوع بپیوندد در حالی که قبل از ایجاد فرو چاله از هیچ سابقه‌ای برخوردار نبوده از سوی دیگر این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در وضعیت جهت و سرعت جریان و بیلان آب زیرزمینی، نتایج ناهنجار بیشتری در پی داشته باشد (چن و همکاران۳، ۲۰۱۶: ۴۷۰). عوامل تخریب و فرسایش در روی سنگ‌های آهکی ناهمواری‌های جالبی بر جا می‌گذارند که به نام ناهمواری‌های کارستی نامیده می‌شوند از طرف دیگر در سنگ‌های غیر آهکی مانند سنگ نمک و ژیپس می‌توان اشکال مختلف کارست را مشاهده کرد، زیرا عمل انحلال در این‌گونه سنگ‌ها نیز عمل می‌شود ولی به علت اینکه این‌گونه سنگ‌ها در طبیعت گسترش زیادی ندارند نام کارست از نظر ژنتیکی مختص سنگ‌های آهکی است و فرایند فرونشست و سینک‌هول در سنگ‌های آهکی بیشتر رخ می‌دهد (مونتگومری، ۱۹۵۱: ۲۴۰). یکی از سنگ‌هایی که کارستی شدن به‌راحتی و به‌سرعت در آن اتفاق می‌افتد، سنگ گچ (ژیپس و انیدریت) است. وقوع فرو چاله در مناطق کارستیک (مناطقی که دارای خوردگی و انحلال توده سنگ‌های

[1] frumkin
2 Oh
3Chen

کربناته از قبیل آهک یا سنگ گچ است) امری بدیهی است و اگر در مناطقی باشیم که سنگ‌های آهکی زیردشت باشد، ممکن است با فروریختن سقف غارها زیردشت پدیده فرو چاله شکل گیرد(کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹: ۶).

اولین فرونشست شناسایی شده در اثر بهره‌برداری و برداشت بی‌رویهٔ از آب‌های زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی در ایالت کالیفرنیای آمریکا و در ناحیهٔ سانتاکلرا رخداده است(فرامکین، ۲۰۱۱:۱۰۷). یکی از بهترین نمونه‌های فرونشست زمین در اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در دنیا ناحیه‌ای به نام درّهٔ"سان جاکوئین" در کالیفرنیای آمریکا می‌باشد که فرونشستی برابر با ۹ متر در بین مهر و موم‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۲۵ در نقطهٔ بیشینهٔ آن گزارش شده است (چن و همکاران، ۲۰۱۶، ۴۷۲). در ایران اولین دشتی که در آن نشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی گزارش گردیده است، دشت رفسنجان (۱۳۴۶) بوده که به ازای هر ۱۰ متر افت سطح آب زیرزمینی حدود ۴۱ سانتی‌متر نشست سطح زمین گزارش شده است (عباس نژاد، ۱۳۷۷: ۳۱۳). در سه دههٔ اخیر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی دشت کاشمر باعث افت بیش از ۱۹ متر در سطح آب زیرزمینی شده و هرساله حدود ۱۶ میلیون مترمکعب بر کسری حجم مخزن افزوده می‌شود (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۰۸۳).

نریزی و جان‌پرور(۲۰۰۴) بر اساس مطالعاتی در دشت مشهد اعلام نمودند میزان بهـره‌بـرداری از آب‌های زیرزمینی از سال ۱۳۵۰-۱۳۸۴ به میزان ۴/۶ میلیارد مترمکعب افزایش یافته و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۳۹۹ میلادی به میزان ۲/۵ میلیارد مترمکعب دیگر نیز افزایش یابد. همچنین عوامل مهمی که باعث افزایش بهره‌برداری شده‌اند توسعه زیـاد سـطح زیـر کشت، توسعه صنعت، توسعه شهری، افزایش جمعیت را اعلام نمودند. حسین و والادان (۲۰۰۷) در بررسی‌های مشابه در دشت مـشهد بـه این نتیجه رسیدند که تعداد چاه‌های این دشت در سال ۱۳۴۴، تعداد ۲۳۱ حلقه بوده که در سال ۱۳۷۲ به ۳۶۱۹ حلقه افزایش‌یافته است. شمسی‌پور و حبیبی (۲۰۰۸) بررسی دشت‌های شمال همدان، علت کاهش سطح آب‌های زیرزمینی را تأثیر پارامترهای اقلیمی و خشک‌سالی در مدت ۱۷ سال آماری با ضریب همبستگی ۴۲ درصد معرفی نمودند. در مطالعات فرونشست زمین کمتر به تغییرات ژئومورفولوژی دشت‌ها توجّه شده و مطالعات انجام شده در این خصوص بسیار محدود است. در این زمینه می‌توان به مطالعات صالحی و همکاران ۱۳۹۰ اشاره کرد که با بررسی شکاف‌های حاصل از فرونشست زمین در دشت مهیار جنوبی در شمال شهرضای استان اصفهان و تأثیر آن بر زمین‌های کشاورزی پرداخته‌اند. همچنین شریفی کیا و همکاران (۱۳۹۲) میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری را در برابر مخاطره فرونشست بررسی کردند. افضلی (۱۳۹۲) نیز مطالعات خود را بر روی عوارض ژئومورفولوژی حاصل از نشست زمین در دشت دامغان معطوف کرده‌اند.

در پژوهشی در شهر سامچوک کره با بکار بردن شبکه عصبی مصنوعی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌پیش بینی فرونشست زمین پرداخته است. برای ارزیابی فاکتورهای حاکم بر فرونشست زمین، یک پایگاه داده فضایی از معیارهای مؤثر ایجاد شد. سپس شاخص مخاطره فرونشست زمین در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی نقشه سازی شد. نقشه مخاطره به وجود آمده برای فرونشست زمین با داده‌های میدانی و موقعیت‌های فرونشست موجود در منطقه دارای صحت

۹۶/۰۶ درصد را نشان می‌داد (کیم و همکاران[۴]،۲۰۰۹: ۶۲). در پژوهشی دیگر ارزیابی ریسک فرونشست زمین در منطقه ساحلی تیانجین چین پرداخته شده است. در این مطالعه شاخص ارزیابی ریسک فرونشست زمین بر مبنای شاخص ریسک خطر به وجود آمده است. نقشه ریسک فرونشست زمین با ترکیب کردن مخاطره و آسیب‌پذیری و نقشه ظرفیت و کاهش فرونشست زمین ایجاد شده بود. مقادیر ریسک به ۵ طبقه خیلی بالا، بالا، متوسط، پایین و خیلی پایین طبقه‌بندی شد(بی‌بی و همکاران[۵]۲۰۰۹: ۲۷۰). همچنین در مطالعه‌ای ارزیابی فرونشست زمین با بکار بردن سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل WOE ، ۷ فاکتور اصلی شامل عمق گسل‌ها، فاصله گسل‌ها، درجه شیب به دست آمده از نقشه‌های توپوگرافی، سطوح عمق آب زیرزمینی و قابلیت نشست از داده‌های فرو چاله، زمین‌شناسی و کاربری اراضی جهت فرونشست زمین تعیین گردید (هیو، ۲۰۰۶).

در مطالعات فرونشست زمین کمتر به تغییرات ژئومورفولوژی دشت‌ها و پدیده فرو چاله‌ها توجه گردیده است. با توجّه به فراگیر شدن مخاطرهٔ محیطی فرو چاله زمین در بسیاری از دشت‌های بحرانی کشور، لزوم بررسی این مخاطره و پیامدهای ژئومورفولوژیکی آن حائر اهمیت است. در این میان استان اصفهان نیز یکی از مناطقی است که به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی طی مهر و موم‌های اخیر با این مسئله مواجهه بوده است. این امر ناشی از کاهش نزولات آسمانی و خشکسالی‌های مداوم، کاهش منابع آب سطحی به دلیل برداشت در سرشاخه‌ها و افزایش مصرف در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد. نتیجه این سوء مدیریت‌ها، افزایش تعداد و عمق چاه‌های آب است در موارد زیادی این حفاری‌ها بدون مجوز، صورت گرفته و سطح سفره‌های آب زیرزمینی در دشت‌های استان را بشدت کاهش داده است(لشکری پور، ۱۳۸۶: ۲۴). بررسی آمارها نشان می‌دهد که میزان برداشت غیرمجاز از منابع آب زیرزمینی در استان اصفهان به حدود ۷۰۰ میلیون مترمکعب در سال و میانگین کسر مخزن سالانه به ۲۵۰ میلیون مترمکعب بالغ می‌گردد. برداشت کلی از منابع آب زیرزمینی شامل قنوات، چاه‌ها و چشمه‌ها است که شرایط را بحرانی‌تر کرده است. (نریزی و جان‌پرور، ۲۰۰۴: ۱۹). شهرستان سمیرم از این امر مستثنا نیست، افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های این منطقه سالانه اتفاق می‌افتد. در این پژوهش با توجّه به افت سطح آب‌های زیرزمینی که حاصل آن نشست زمین و ایجاد شکاف در بخش‌های مختلف این شهرستان بوده، تغییرات ژئومورفولوژیکی دشت، شکاف‌ها و ترک‌های حاصل از فرو چاله زمین بررسی شده است.

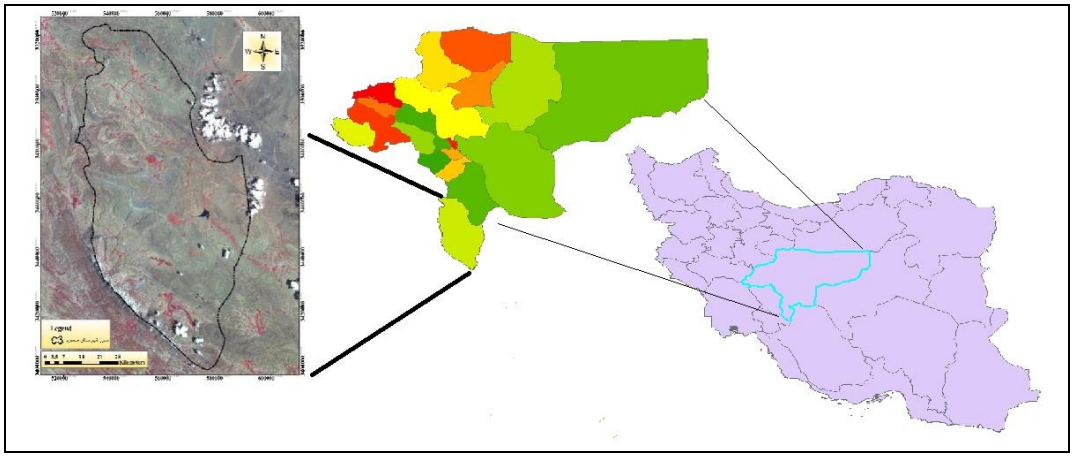
محدوده مورد مطالعه

شهرستان سمیرم در ۱۶۵ کیلومتری جنوب استان اصفهان به مساحت ۵۲۲۴ کیلومترمربع واقع شده است. شهرستان سمیرم از دو بخش مرکزی و پادنا تشکیل شده است. منطقه سمیرم در سه بخش زمین ساختی ایران شامل سنندج–

[۴] Kim and et al

[۵] beibei al

سیرجان، زاگرس مرتفع و زاگرس چین‌خورده قرار دارد. از نظر چینه شناسی، سنگ‌های مربوط به دوره‌های مختلف در کل منطقه قابل مشاهده است. نهشته‌های کواترنری شامل تراس‌های جدید و قدیم رودخانه‌های فصلی و دائمی است که شامل اراضی زراعی می‌باشد (جلالیان، ۱۳۷۶: ۱۶۲). حدود ۸۵ درصد کل منطقه دارای ارتفاع ۳۰۰۰– ۲۰۰۰ متر از سطح دریاست. بیش از ۹۶ درصد سطح شهرستان دارای میانگین دمای ۱۲/۵–۷/۵ درجه است. متوسط بارندگی سالانه در این منطقه از حدود ۳۰۰ ملی متر در بخش شمال شرقی تا بیش از ۹۰۰ میلی‌متر در بخشی از ارتفاعات دنا در نوسانات است. شکل (۱) موقعیت شهرستان در استان را نشان می‌دهد.



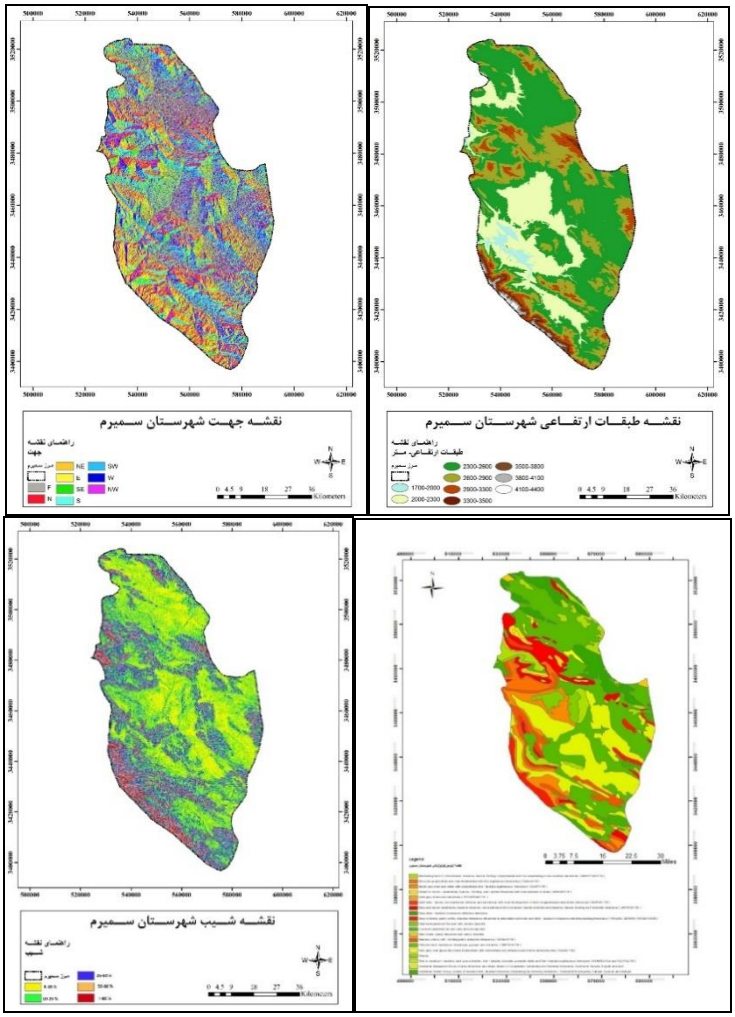
مآخذ: نگارندگان

شکل ۱: موقعیت شهرستان سمیرم در استان اصفهان

داده‌ها و روش‌ها

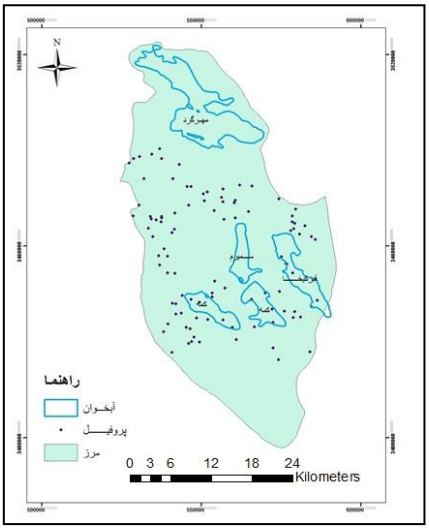
با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، DEM، نقشه ارتفاع، شیب و جهت از منطقه ایجاد گردید (شکل ۲)، با بازدید میدانی و مشاهده عوارض و پدیده‌های روی زمین، نقشه زمین‌شناسی و نهایتاً تجزیه و تحلیل داده‌ها و آنالیز و تحلیل عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای، نقشه ژئوموفولوژیکی منطقه تهیه گردید.

اطلاعات موقعیت چاه‌ها، قنوات و چاه‌های غیرمجاز منطقه از سازمان آب منطقه‌ای استان تهیه شد. همچنین اطلاعات مربوط به تراز آب زیرزمینی در بازه‌های ۵ ساله (۱۳۸۴ تا ۱۳۹۶) جهت ارزیابی خطر فرو چاله در مناطق مورد مطالعه، استفاده شد. بر اساس نقشه سازندهای زمین‌شناسی حدود ۱۲۰ پروفیل‌های خاکی به ابعاد ۱/۵×۱×۱/۵ عمق، عرض و طول در قسمت‌های مختلف شهرستان سمیرم ایجاد شد و درصد آهک (کربنات کلسیم، ژیپس) و اطلاعات دیگری از آن استخراج شد با توجه به اینکه خاک نمادی از بستر یک سازند زمین‌شناسی است با مطالعه خاک می‌توان تا حدی به جنس لایه‌های پایینی زمین پی برد. موقعیت پروفیل‌ها همراه با موقعیت آبخوان‌ها در شکل (۳) مشاهده می‌گردد. در راستای شناسایی مناطق کارستی، با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی، خاک، ژئومورفولوژی و اطلاعات پروفیل‌ها، سهم مناطق کارستی در محیط GIS شناسایی گردید.



مآخذ: نگارندگان

شکل ۲: نقشه شیب ،جهت، ارتفاع، زمین‌شناسی



مآخذ: نگارندگان

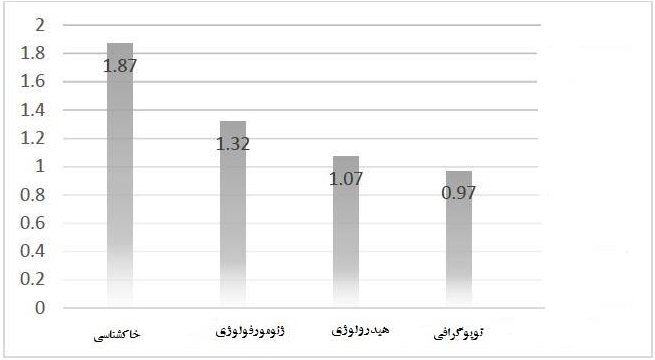
شکل ۳: موقعیت آبخوان‌ها و پروفیل خاک در محدوده مورد مطالعه

برای تحلیل و بررسی پیوستگی مکانی متغیر محیطی مورد نظر، از تابع واریوگرام کریجینگ استفاده شد. معمول‌ترین و ساده‌ترین روش تخمین در زمین آمار، کریجینگ معمولی است که در این روش برای تخمین مقدار یک متغیر در نقطه‌ای که اطلاعات آن اندازه‌گیری نشده است، به کار می‌رود. در صورتی $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در مکان مقدار تخمین زده شده متغیر در نقطه (x_O) از ترکیب خطی زیر است:

$$Z(x_O)=\sum_{i=1}^{n} \lambda i Z(xi)$$

در λi: وزن داده شده به متغیر x و در نقطه i و n : تعداد نقاطی که متغیر در آن‌ها اندازه‌گیری شده است می‌باشد. اطلاعات پروفیل خاک، همچنین میزان کربنات کلسیم از هر نقطه در محیط GIS به جدول اطلاعاتی نقاط اضافه و محاسبه گردید و موقعیت هر پروفیل بر روی نقشه برآورد شد. طبق تقسیم‌بندی علمی کارست توسط سویجیک، کارست در ناحیه‌ای ایجاد می‌شود که کاملاً از سنگ‌های کربناته انحلال پذیر تشکیل شود(کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹: ۱۷). لذا با ایجاد پروفیل و شناسایی میزان کربنات کلسیم تا حدودی به موقعیت کارست‌های منطقه می‌توان پی برد. به علت وجود ارتباط کارست و هیدروژئولوژی فرایندهای کارستی فعال‌تر هستند و فعالیت انحلالی سنگ‌های کربناته بیشتر است.

از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی به‌منظور وزن دهی به معیارها برای پهنه‌بندی احتمال ریسک فرو چاله زمین در شهرستان سمیرم به‌عنوان متغیر وابسته استفاده شد. برای تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ابتدا بایستی وزن هر عامل تعیین شود. برای این کار ابتدا با مراجعه به منابع معتبر و استفاده از نظرات کارشناسان، لایه‌ها اولویت‌بندی شدند و ضرایب و وزن آن‌ها با بهره‌گیری از مدل AHP به دست آمد. تمامی معیارها یا متغیرهای مستقل شامل ویژگی‌های ژئومرفولوژیک، توپوگرافیک، خاکشناسی و هیدرولوژیک به‌صورت دوتایی باهم مقایسه شدند. همچنین متغیرهای مستقل همبستگی بالایی با متغیر کمکی دارد. سپس مقایسه‌ها را به‌صورت زوجی بین تمام عوامل انجام و با مقادیر ۱ تا ۹ اهمیت عوامل نسبت به هم امتیاز دهی شد، طبق بررسی‌های انجام شده در طبقات مختلف عوامل بین چهار عامل خاک دارای بیشترین درصد اهمیت و توپوگرافی کم اهمیت‌ترین عامل در نظر گرفته شد و سایر عوامل نیز اهمیت بینابینی داشتند شکل(۴).



مأخذ: گارندگان

شکل ۴: نمودار وزن نسبی متغیرها بر اساس مقایسات زوجی

سپس در محیط ArcGIS 10.2 برای هر عامل در هر طبقه بر اساس وزنشان که از روش AHP محاسبه شد لایه رستری تهیه گردید. برای اجرای مدل فازی باید برای هر یک از لایه‌های فوق توابع عضویت تعیین شود که از تابع عضویت ذوزنقه‌ای استفاده شد، لایه‌های فازی شده در محیط GIS ترکیب شدند و نهایتاً نقشه احتمال ریسک فرونشست زمین در منطقه تهیه شد.

یافته‌ها

آبخوان‌های شهرستان سمیرم شامل آبخوان‌های کمه، گاو تپه، سمیرم، قبرکیخا و مهر گرد، از نوع آبخوان سطحی نیمه تحت فشار می‌باشند. حفر چاه‌های عمیق در مناطق مختلف شهرستان موجب افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌ها شده است که در این میان بیشترین میزان کاهش تجمعی سطح ایستابی در آبخوان گاو تپه اتفاق افتاده است. بر اساس آمار سازمان آب منطقه‌ای استان اصفهان (۱۳۹۶) متوسط کاهش سطح آب زیرزمینی در آبخوان گاو تپه در دوره ۱۰ ساله منتهی به ۱۳۹۵ در هرسال به میزان ۲ متر و میانگین تغییر حجم آبخوان ۵/۱۰- میلیون مترمکعب از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۵ بوده است (جداول ۱ و ۲ و شکل ۵).

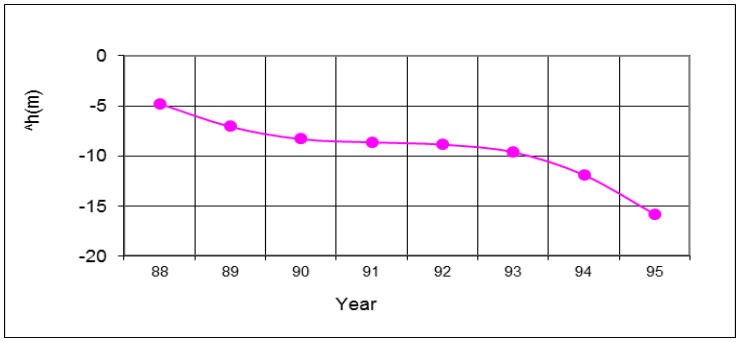
جدول ۱: تغییرات سطح آب آبخوان‌های مهم شهرستان سمیرم از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۵

نام آبخوان	وسعت آبخوان (کیلومترمربع)	سال شروع اندازه‌گیری	میزان کاهش تجمعی سطح ایستابی (متر)	میانگین سالانه کاهش سطح ایستابی(متر)	حجم کاهش (میلیون مترمکعب)	میانگین سالانه کاهش حجم (میلیون مترمکعب)
کمه	۸۲	۱۳۸۵	-۶	۰,۶	۱۴	۱,۵
گاو تپه	۸۶	۱۳۸۷	-۱۶	۲,۰	۴۱	۵,۱
سمیرم	۷۴	۱۳۸۵	-۹	۱,۰	۲۱	۲,۱
قبر کیخا	۱۳۴	۱۳۸۵	-۴	۰,۴	۲۳	۲,۳
مهر گرد	۳۹۶	۱۳۸۵	-۵	۰,۵	۶۵	۶,۵

مأخذ: نگارندگان

جدول ۲: وضعیت آبخوان گاو تپه از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۵

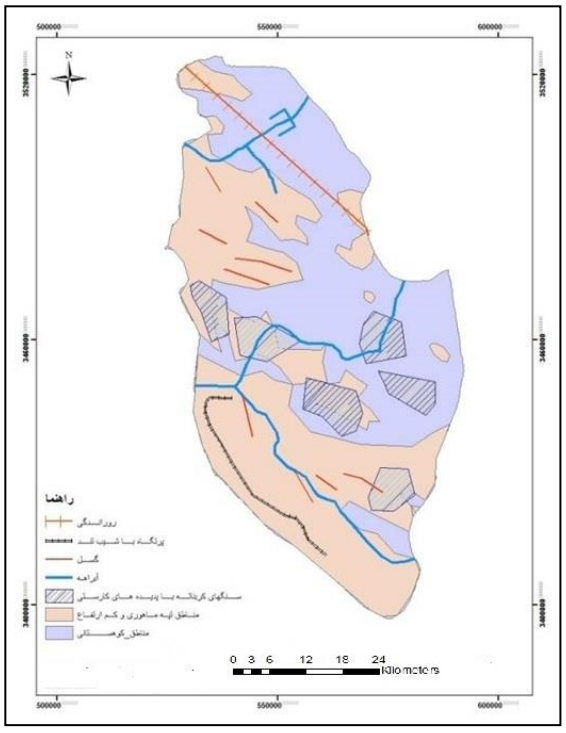
سال آبی		میانگین تغییر سطح ایستابی آبخوان (متر)	میانگین تجمعی تغییر سطح ایستابی آبخوان (متر)	میانگین تغییر حجم آبخوان (میلیون مترمکعب)	میانگین تجمعی تغییر حجم آبخوان (میلیون مترمکعب)
۱۳۸۷	۸۸	-۴/۷۷	-۴/۷۷	-۱۲/۳۱	-۱۲/۳۱
۱۳۸۸	۸۹	-۲/۲۹	-۷/۰۶	-۵/۹۱	-۱۸/۲۱
۱۳۸۹	۹۰	-۱/۲۴	-۸/۳۰	-۳/۲۱	-۲۱/۴۲
۱۳۹۰	۹۱	-۰/۳۱	-۸/۶۱	-۰/۸۰	-۲۲/۲۲
۱۳۹۱	۹۲	-۰/۲۳	-۸/۸۴	-۰/۵۹	-۲۲/۸۲
۱۳۹۲	۹۳	-۰/۷۶	-۹/۶۰	-۱/۹۶	-۲۴/۷۸
۱۳۹	۹۴	-۰/۲۹	-۱۱/۸۹	-۵/۹۱	-۳۰/۶۹
۱۳۹۴	۹۵	-۳/۹۲	-۱۵/۸۱	-۱۰/۱۱	-۴۰/۸۰
متوسط سالانه		**-۱/۹۸**		**-۵/۱۰**	



مآخذ: نگارندگان

شکل ۵: میانگین تجمعی تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان گاو تپه بین مهر و مومهای ۱۳۹۵-۱۳۸۷

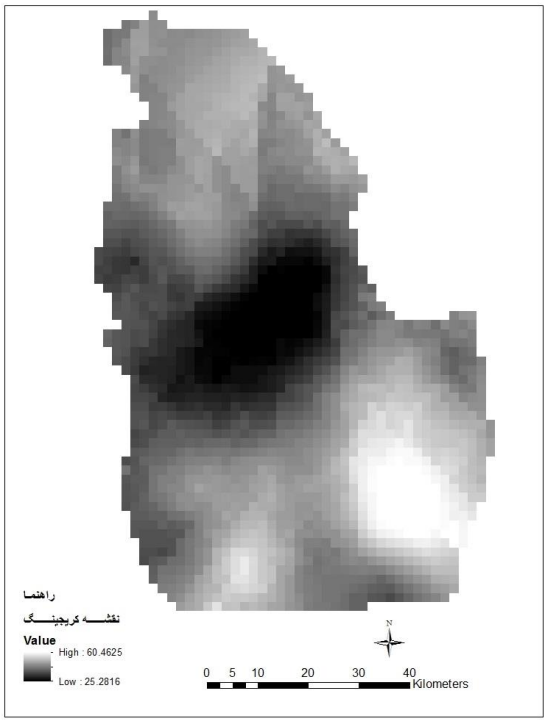
اطلاعات حاصل از نقشه ژئومرفولوژی (شکل ۶) نشان می‌دهد که سنگ‌های کربناته با منشأ کارستی بیشتر در مناطق مرکزی و جنوبی شهرستان سمیرم پراکنده‌اند. این سنگ‌ها در منطقه مرکزی، با واحدهای اراضی کوه و تپه توأم می‌باشند. این در حالی است که در منطقه جنوبی به‌ویژه منطقه کمه، این سازند با اراضی مسطح و کم ارتفاع توأم شده است که شرایط لازم برای برداشت آب‌های زیرزمینی از طریق حفر چاه‌های عمیق را دارا است.



مآخذ: نگارندگان

شکل ۶: نقشه ژئومورفولوژی شهرستان سمیرم

طبق تقسیم‌بندی چویجینک، و مطالبی که ذکر شد، برای بررسی دقیق‌تر اطلاعات پروفیل‌های منطقه، نقشه پهنه‌بندی پروفیل کربنات کلسیم خاک یعنی بسترهای دارای کف آهکی (کربنات کلسیم و ژیپس) در محدوده مورد نظر (شکل ۷) با استفاده از مدل کریجینگ در محیط GIS تهیه شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد بیشترین تجمع پروفیل کربنات کلسیم در منطقه در بخش‌های جنوب شرقی و جنوب غربی یعنی کمه و پادنا واقع است.



مآخذ: نگارندگان

شکل ۷: نقشه پهنه‌بندی پروفیل کربنات کلسیم در محدوده شهرستان سمیرم

با بررسی‌های میدانی و استفاده از نقشه‌های ژئومورفولوژی منطقه، DEM ۸۰ متر، موقعیت نقاط کارستی، وضعیت آبخوان، گسل‌ها، موقعیت چاه‌های غیرمجاز و نقشه پهنه‌بندی کربنات کلسیم می‌توان پهنه‌هایی که در معرض خطر و مستعد فرو چاله در شهرستان سمیرم است، مشخص گردید(شکل ۸).

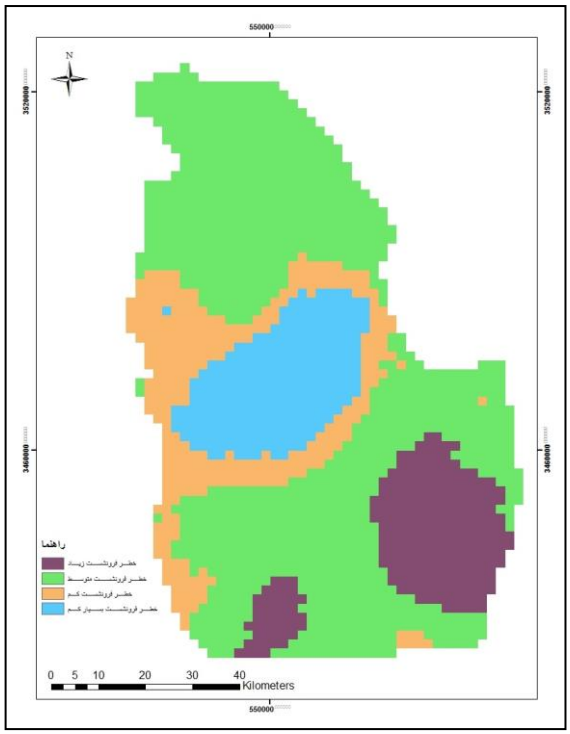
به‌منظور پهنه‌بندی ریسک فرو چاله زمین در شهرستان سمیرم از نقشه زمین‌شناسی، میزان شیب، فاصله از خطوط گسل، میزان افت سطح آب زیرزمینی، چاه پیزومتری، نقاط کارستی و نقشه پهنه‌بندی کربنات کلسیم و ژیپس استفاده شد. ابتدا نقشه‌های اولیه وارد سیستم اطلاعات جغرافیایی شده و به‌صورت سیستم مختصات یکسان تبدیل گردید. سپس به‌منظور تهیه نقشه پهنه ریسک فرو چاله زمین، تمامی نقشه‌ها رستری شدند. برای این منظور به‌طور مثال برای نقشه خطوط گسل از تابع فاصله در سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی به‌منظور وزن دهی به معیارها برای پهنه‌بندی احتمال ریسک فرو چاله زمین در سمیرم استفاده شد. محاسبه وزن‌ها از طریق محیط

GIS انجام گردید. تمامی معیارها به‌صورت دوتایی (دو به دو) با هم مقایسه شدند. برای انجام این محاسبات از نظر کارشناسان خبره در منطقه استفاده گردید و نهایتاً نقشه پهنه‌بندی ریسک تهیه شد شکل (۸ و ۹).

مآخذ: نگارندگان

شکل ۸: فرو چاله در منطقه وردشت سمیرم

جدول ۳ وسعت و درصد خطر فرو چاله در محدوده شهرستان سمیرم را مشخص می‌کند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد بیشترین خطر فرو چاله مربوط به منطقه کمه و پادنا در جنوب شهرستان است.



مآخذ: نگارندگان

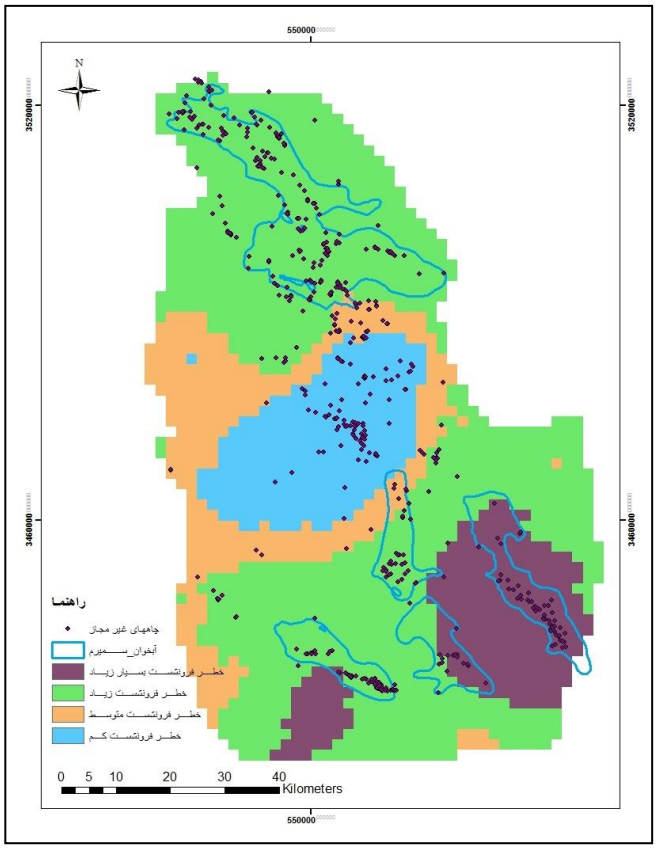
شکل ۹: نقشه ریسک خطر فرو چاله در شهرستان سمیرم

جدول ۳: درصد و وسعت خطر فرو چاله

خطر فرونشست	مساحت (هکتار)	درصد
بسیار زیاد	۶۰۴۸۴	۱۳/۲
زیاد	۲۵۹۳۹۲	۵۶/۹
متوسط	۷۵۱۷۵	۱۶/۵۱
کم	۶۰۱۸۱	۱۳/۲

مأخذ: نگارندگان

شکل (۱۰) موقعیت چاه‌های آب در حال بهره‌برداری شهرستان سمیرم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد بیشترین تمرکز چاه‌ها در مناطق شمالی، مرکزی و جنوبی واقع است. این تمرکز بسته به وسعت و حجم کل آبخوان موجب افت سطح آب زیرزمینی در مناطق ذکر شده گردیده است. لایه چاه‌های غیرمجاز و لایه سنگ‌های آهکی در محیط GIS با ضریب وزنی زیاد، بیشترین تأثیر در ایجاد فرو چاله را به همراه داشتند.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱۰: موقعیت چاه‌های غیرمجاز در نقشه مناطق مستعد به خطر فرو چاله

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل هیدرو گراف و تغییرات به وجود آمده در حجم ذخیره آبی آبخوان‌ها و شواهد آن نشان داده که میانگین تغییرات حجم آبخوان‌ها در شهرستان سمیرم به‌طور متوسط سالانه ۵/۱۰ – میلیون مترمکعب است.

نقشه پهنه‌بندی خطر فرو چاله بیانگر آن است که ۱۳/۲ درصد از مساحت در پهنه ریسک خیلی زیاد ،۵۶/۹ درصد در پهنه ریسک زیاد، ۱۶/۵۱ درصد ریسک متوسط و ۱۳/۲ درصد ریسک کم را به خود اختصاص داده است.

نتیجه‌گیری

نقشه‌های خروجی حاصل از مدل فازی نشان می‌دهد که بیشترین احتمال وقوع پدیده فرو چاله مربوط به منطقه کمه واقع در بخش پادنا در جنوب غربی شهرستان سمیرم و به فاصله ۶۵ کیلومتری از مرکز شهرستان یعنی شهر سمیرم می‌باشد. این بخش از شهرستان دارای بیشترین باغ‌های سیب شهرستان سمیرم است و جمعیت شهری ساکن در این منطقه، نیاز به منابع آب زیرزمینی را به دنبال داشته است به نحوی که حدود ۴۰ قنات و ۲۴۵ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق جهت تأمین نیاز آبی در این منطقه حفر شده است. هنگامی که چاه‌های آب به حفرات و مجاری سنگ کف آهکی برسند، از آبدهی خوبی برخوردار می‌شوند و در اثر پمپاژ، آب با سرعت زیاد از حفره‌ها تخلیه می‌گردد و اگر لایهٔ پوشش فوقانی سفره آب زیرزمینی دارای آب باشد، تحت فشار هیدرو استاتیکی آب موجود در آن‌ها به‌سرعت از طریق حفره‌های موجود در سطح سنگ کف و مجاری متصل به آن، به‌سوی چاه در حال پمپاژ رانده می‌شود و در اثر حرکت سریع و رو به پایین، رسوبات موجود در حفره سطحی به‌سوی غارهای زیرزمین و چاه پمپاژ رانده می‌شوند و یک خالی‌شدگی کمانی حاصل می‌گردد از آنجایی که به‌طور مداوم رسوب‌های شسته می‌شوند و حفره وسیع‌تر می‌شود، به‌طور مرتب ریزش‌های کمانی ادامه می‌یابد و هر چه ناپایداری لایه‌های رسوبی فوقانی بیشتر باشد عمل فروریزش کمانی با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد. این در حالی است که اکثر چاه‌های آب منطقه دارای سنگ کف آهکی است و با برداشت آب و پمپاژ آن امکان فرو چاله در منطقه است. برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در قسمت جنوب و جنوب شرقی و وجود سازندهای آبرفتی کواترنری که با افت آب‌های زیرزمینی و خالی شدن فضای بین رسوبات همراه است احتمال فرو چاله در این منطقه را بیشتر خواهد کرد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در شهرستان سمیرم به‌ویژه مناطق جنوبی که بیشترین تمرکز باغ‌های سیب را دارد، موجب کاهش شدید سطح آبخوان‌های این مناطق شده و خطر فرونشست و ایجاد فرو چاله‌های عمیق و عظیم در چند قدمی این مناطق است. پدیده‌ای که از آن می‌توان به‌عنوان "مرگ آبخوان" یاد کرد. این پدیده، تغییر الگوی جریان‌های زیرزمینی و سطحی، کاهش ظرفیت مخازن آبخوان‌ها، خسارت به سازه‌های دست‌ساز بشر مانند ساختمان‌ها، پل‌ها و خطوط انتقال نیرو، معکوس شدن شیب کانال‌های آبیاری و زهکشی افزایش خطر وقوع سیل و در مواردی افزایش خطر وقوع زلزله را به دنبال خواهد داشت. اخیراً (سال ۱۳۹۷) گودالی با وسعت دو متر در سه متر در قسمت وردشت در ۲۳ کیلومتری شمال سمیرم ایجاد گردید که حاکی از وقوع زودهنگام مخاطره فرو چاله در این شهرستان است. نقشه پهنه‌بندی در این پژوهش، رخ داد این موضوع را اثبات می‌کند. این مخاطرات، لزوم توجه به مفهوم پایداری را در پروژه‌های اقتصادی صد چندان می‌نماید.

منابع

۱- آمیغ پی، معصومه. عربی، سیاوش. طالبی، علی. (۱۳۸۹): بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و ترازیابی دقیق. فصل‌نامهٔ علوم زمین، ۲۰ (۷۷):۱۵۷-۱۶۴.

۲- افضلی، عباسعلی، شریفی کیا، محمد، شایان، سیاوش (۱۳۹۲): ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و سکونتگاه‌ها از پدیدهٔ فرونشست زمین در دامغان، دو فصل‌نامهٔ ژئومورفولوژی کاربردی ایران، سال اوّل، شماره اوّل، صص ۸۵-۷۰.

۳- جلالیان، احمد. (۱۳۷۶): مطالعات تعیین منابع و قابلیت اراضی منطقه سمیرم. وزارت جهاد سازندگی. جهاد سازندگی استان اصفهان.۱۶۰-۱۶۵.

۴- کریمی وردنجانی، حسین. (۱۳۸۹): هیدروژئولوژی کارست. انتشارات ارم شیراز. چاپ اول.

۵- شریفی کیا، محمد، مال امیری، نعمت، سیاوشی، شایان (۱۳۹۲): سنجش میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری در برابر مخاطره فرونشست زمین (مطالعهٔ موردی بخشی از جنوب شهر تهران)، مجلّهٔ جغرافیا و مخاطرات محیطی، شمارهٔ پنجم، صص. ۹۱-۱۰۶.

۶- شمسی‌پور، ع. ا. حبیبی، ک. (۱۳۸۲): ارزیابی اثرات خشک‌سالی بر منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت همدان).

۷- صالحی اسفندرانی، رضا، غفوری، محمد، لشکری پور، غلامرضا، دهبان، مریم (۱۳۹۲): بررسی فرونشست دشت مهیار جنوبی، با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، مهندسی آبیاری و آب ایران، دورهٔ ۳ شمارهٔ ۱۱، صص ۵۷-۴۷.

۸- عباس نژاد، احمد (۱۳۷۷): بررسی شرایط و مسائل زمین‌شناسی محیطزیست دشت رفسنجان، فشرده مقالات دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، صص ۳۱۰-۳۰۳

۹- لشکری پور، غلامرضا، غفوری، محمد، کاظمی گلیان، رمضان، دم شناس، مهدی. (۱۳۸۶): نشست زمین در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت نیشابور، پنجمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیطزیست ایران، ۱۰۸۲-۱۰۹۲.

10- Beibei, H. Jun, Z. Wang, J. Zhenlou, C. Dongqi, W. And Shiyuan, X. (2009): Risk Assessment Of Land Subsidence At Tianjin Coastal Area In China. Environmental Earth Science. 59: Pp. 269–276

11- Chen, M. Tomás, R. Li, Z. Motagh , M. Li , T. Hu, L. Gong , H. Li, X. Yu, J. Gong, X. (2016): Imaging Land Subsidence Induced By Groundwater Extraction In Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry, Remote Sens, (6): Pp. 468.

12- Frumkin Amos, Ezersky Michael, Abdallah Al-Zoubi, Emad Akkawi, Abdel-Rahman Abueladas. (2011): The Dead Sea Sinkhole Hazard: Geophysical Assessment Of Saltdissolution And Collapse, Geomorphology (134): Pp. 102–117.

13- Hu, R.L. (2006): Urban Land Subsidence In China, IAEG, Paper No.786, 8P.

14- Hussein, M. And Valadan, M.J. (2007): Land Subsidence Monitoring Using In SAR And GPS. Http://Www.Isprs2007ist.Itu.Edu.Tr/Draft_Program_Ver1.Doc

15- Karimi Vardanjani, Hossein. (1398): Karst Hydrology, Eram Publishing House Of Shiraz, First Edition.

16- Kim, K. Lee, S. And Oh, H. 2009. Prediction Of Ground Subsidence In Samcheok City, Korea Using Artificial Neural Networks And GIS. Environmental Geology. 58: Pp. 61–70.

17- Oh, H. And Lee, S. (2010): Assessment Of Ground Subsidence Using GIS And The Weights-Of-Evidence Model. Engineering Geology. 115: Pp. 36–48.

18- Nairizi, S. And Janparvar, M. (2004); Mashhad Plain Groundwater Management Under Drought. Condition. 22p. (In Persian)

Http://Www.Rcuwm.Org.Ir/Events/Workshop /09/Files/Final%20S%20Nairizi.Pdf

19- Montgomery, C. W. (1951): Environmental Geology, Sixth Edition, Mcgraw-Hill Companien, Pp. 239-240.