بررسی تأثیرات پدیده فرونشست بر ابنیه تاریخی (منطقه سه اصفهان)

دلارام امینی*[1]، مریم کافی[2] ، محمدرضا طالبی [3]

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات جغرافیایی ، delaramaminii360@gmail.com

2- دانش آموخته کارشناسی ارشد برنامه ریزی شهری ، maryamkafi05@gmail.com

3- دانش آموخته کارشناسی ارشد برنامه ریزی شهری ، mhmdrza71.t@gmail.com

خلاصه

فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پائین سطح زمین، یکی از رویدادهای ناشی از عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی می‌باشد.کلان شهر اصفهان یک شهر حائز اهمیت به لحاظ تاریخیست که سال‌هاست مورد بی‌مهری مسئولین قرار گرفته است. در سال‌های اخیر به دلیل خشکسالی، قطع آبخوان زاینده رود، کاهش سطح آب‌های زیر زمینی و افزایش مهاجرت، پدیده‌ی فرونشست ایجاد گردیده که به دنبال آن زمین‌های کشاورزی، ساختمان‌های مسکونی، آثار تاریخی و از همه مهم‌تر جان ساکنین را مورد تهدید قرار داده است. از این جهت تحقیق در مورد این موضوع امری ضروری به نظر رسید که با بررسی سوابق و پیشینه، اطلاعات زمین شناسی موجود، نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های میدانی و اطلاعات مربوط به حفر چاه، جنس و ضخامت خاک، نقاط نشست حداکثری و روند پیشروی فرونشست بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی مسیر فرونشست به صورت یک زون کشیده جنوب غرب - شمال شرق از سمت فلاورجان و دو زون مجزا در محدوده‌ی شمالی دشت برخوار با نرخ حداکثری(99.4- تا 151-) و یک نوار شرقی غربی بین دو زون با نرخ حداقل (1.5 تا 21.8) در سال 1400 را نشان می‌دهد که این میزان در منطقه سه به صورت موردی بر روی ابنیه تاریخی بررسی و نتایجی برای آن بدست آمده است.

کلمات کلیدی: فرونشست، ابنیه تاریخی، آب‌های زیرزمینی، منطقه سه شهرداری اصفهان

1. مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل تغییرات اقلیمی و خشکسالی و همچنین فقدان نظارت در حفر چاه‌های کشاورزی بسیاری از سفره‌های زیرزمینی کشور مورد برداشت غیراصولی قرارگرفته‌اند که این امر موجب منفی شدن بیلان آبخوان‌ها شده است،

تا جایی که بنا بر گزارش سازمان زمین شناسی بیشتر دشت‌های کشور دچار افت سطح آب زیرزمینی شده‌اند. یکی از مخاطراتی که به دلیل عملکرد تدریجی کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، پدیده فرونشست است که در سال‌های اخیر به علت افزایش بهره برداری از سفره‌های مهم زیرزمینی در دشت‌های بارز کشور به صورت مشکلی فراگیر نمایان شده است [1].

فرونشست زمین ارتباط تنگاتنگی با فعالیت‌های انسانی دارد. به ویژه، توسعه فناوری منجر به افزایش تصاعدی تولیدات صنعتی و کشاورزی و همچنین شهرنشینی گسترده، عمدتاً در شهرهای بزرگ شده است. عملکرد این پارامترها، همراه با اثرات تغییرات آب و هوایی، منجر به افزایش بیشتر تقاضای آب شده است که به مقدار زیاد با بهره برداری بیش از حد از سفره‌های زیرزمینی تأمین شده است. بهره برداری بیش از حد، در ارتباط با شرایط ژئوتکتونیکی گسترده‌تر می‌تواند پدیده‌های شدید فرونشست زمین را آغاز کند و در نتیجه خسارات قابل توجهی را بر محیط فیزیکی و انسان ساخت وارد کند [2].

امروزه، فرونشست یک خطر زمینی در سرتاسر جهان است که توسط انسان و طبیعت ایجاد شده است و نیاز به بررسی دقیق در بسیاری از کشورها (مانند ایالات متحده آمریکا، انگلستان، استرالیا، چین، مصر، فرانسه، آلمان، هند، ایران، ایتالیا، ژاپن، مکزیک، لهستان، عربستان سعودی، سوئد و هلند) دارد [3].

هرچند رخداد پدیده فرونشست از فرکانس و توالی نسبتاً زیادی برخوردار است، اما به واسطه حرکت بسیار کند و آرام زمین در اغلب مواقع درک و اندازه‌گیری آن به درستی میسر نیست. بدین سبب رخداد این پدیده در اغلب نواحی تنها زمانی مورد شناسایی قرار می‌گیرد که در مورفولوژی سطحی و به خصوص در تأسیسات و تجهیزات باعث اثرگذاری شده و تخریب و یا خساراتی به بار آورد. خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف‌های زمین ترمیم ناپذیر، پرهزینه و مخرب هستند و وقوع آن‌ها می‌تواند عاملی در ایجاد و تشدید آسیب‌پذیری کانون‌های استقرار فعالیت‌های انسانی همچون مراکز نظامی - امنیتی واقع در بسترهایی با زیر ساخت مخاطره آمیز طبیعی شود. در صورت وقوع، با توجه به اهمیت ملی و بین المللی این مراکز از جمله شهر تهران، ممکن است امنیت کشور را از نظر داخلی و خارجی به شدت متزلزل کند. برای نمونه فرونشست‌ها موجب ویران شدن سیستم‌های آبیاری، خسارت به چاه‌ها و با پایین آوردن تخلخل خاک‌های حاصلخیز کشاورزی باعث از بین رفتن آن‌ها می‌شوند. همچنین در مناطق روستایی، باعث تغییر هیدرولوژی منطقه و مسبب سیلاب شوند. مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت، ساختمان‌ها و شاهرگ‌های حیاتی به طور خاص مورد آسیب قرار می‌گیرند. این پدیده می‌تواند به خیابان‌ها، پل‌ها و بزرگراه‌ها آسیب زده، خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب را مختل کرده، به پی ساختمان‌ها صدمه زده و باعث ترک در آن‌ها گردد. در نتیجه سازه‌هایی که وسعت زیادتر و ارتفاع بیشتری دارند آسیب پذیرترند. به عنوان مثال خطوط راه آهن، سدهای خاکی، تصفیه خانه‌ها و کانال‌ها آسیب پذیری بالاتری دارند [4].

در این پژوهش اندازه‌گیری نرخ و دامنه فضایی، پدیده فرونشست از طریق نقشه‌های ماهواره‌ای، نمودارهای برداشت آب، برداشت‌های میدانی و تحلیل اطلاعات پایه می‌باشد. از اهدافی که در این پژوهش خواهان رسیدن به آن هستیم، می‌توان به اندازه‌گیری نرخ و دامنه فرونشست در محدوده مورد مطالعه و بررسی میزان و دامنه خسارات احتمالی ناشی از این رخداد اشاره کرد. از این رو بر آن شدیم تا میزان ناپایداری بستر ابنیه تاریخی در برابر خطرات ناشی از فرونشست و همچنین میزان و نوع آسیب‌پذیری آن را در آینده مورد سنجش قرار دهیم.

2. پیشینه

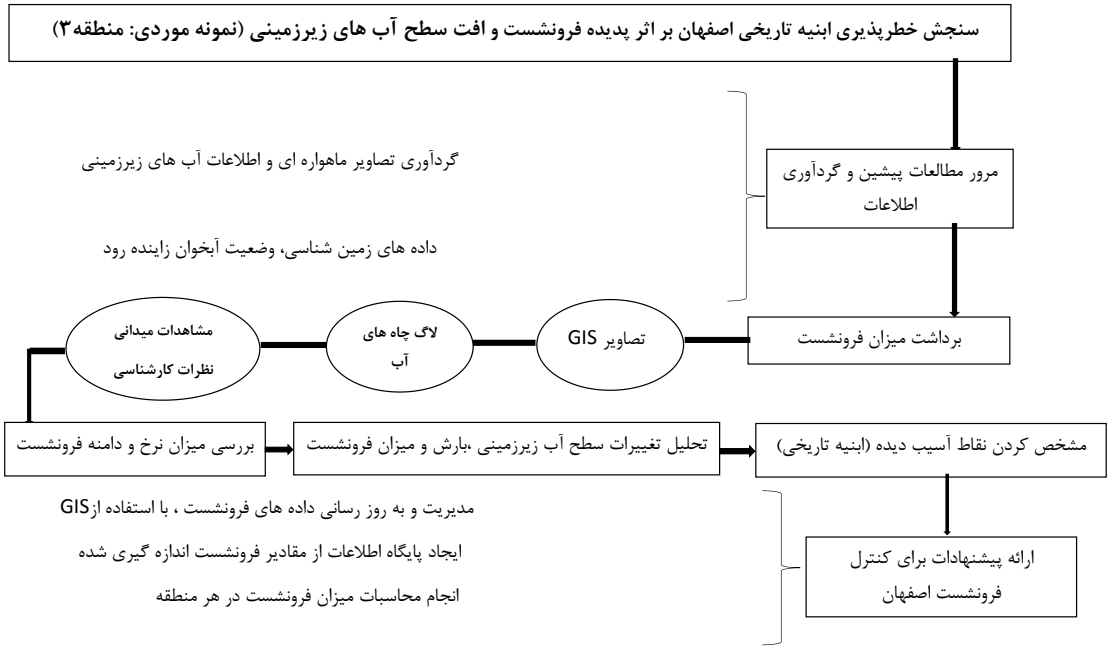
از عمده دلایل فرونشست زمین در ایران می‌توان به برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی برای تأمین نیازهای کشاورزی، صنعتی، مصارف خانگی و غیره اشاره کرد که اکثر آبخوان‌ها را تحت تأثیر قرار داده است.کاهش نزولات آسمانی، مصارف بی‌رویه منابع آب سطحی و زیرزمینی، احداث سدهای مهند سی نشده بر روی زهکش‌های اصلی و جلوگیری از نفوذ از بستر رودخانه‌ها به آبخوان‌ها، افزایش اراضی به ویژه محصولات با آب‌بری بالا و الگوی کشت نامناسب و عدم آبیاری صحیح در چند دهه گذشته باعث بحرانی شدن وضعیت منابع آب در اغلب دشت‌های کشور شده است [5].

بررسی وضعیت بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی در سال آبی (1390-91) ایران نشان می‌دهد که سالانه بیش از 64/5 میلیارد متر مکعب توسط منابع آبی مختلف تخلیه می شود که با توجه به تغذیه سالانه 54/4 میلیارد متر مکعب آبخوان‌ها، نشان دهنده 8/1 میلیارد متر مکعب برداشت بیش از تغذیه است. این برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی باعث شده است که از 609 محدوده مطالعاتی کشور، 284 محدوده از نظر توسعه بهره برداری ممنوعه اعلام شود که 65 محدوده ممنوعه بحرانی هستند. یکی از دلایل اصلی ممنوعه اعلام شدن محدوده‌ها، وقوع پدیده فرونشست و شناسایی علائم آن در سطح دشت‌ها است [6].

از جمله مناطقی که در اثر افت شدید سطح آب زیرزمینی دچار فرونشست شده‌اند، می‌توان به دشت اراک، نهاوند، خمین، گلپایگان، نطنز و ابرکوه اشاره کرد [7]. به طور مشابه، در نقاط مختلف جهان نیز موارد بیشماری از فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی گزارش شده است [8].

طبق گزارش سازمان زمین شناسی، تقریباً از سال 1346 این پدیده در کشور مشاهده شده است و در چند سال اخیر و با حاکمیت شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره برداری رو به افزایش کشاورزی، مصارف آب شرب و صنعتی از منابع آب زیرزمینی، زیر ساخت لازم را برای رویداد این پدیده فراهم آورده است و به عنوان یک بحران جدی در بسیاری از دشت‌های کشور تبدیل شده است [9].

در راستای انجام این تحقیق، بررسی عوامل فرونشست تحت تأثیر فاکتورهای مختلفی است که در این جا با بررسی اطلاعات، نقشه‌ها و فرضیات، در جهت یافتن پاسخ سؤالاتی چون: پهنه‌های فرونشست در اصفهان، میزان حداکثر و حداقلی نرخ فرونشست در اصفهان، شناسایی ابنیه تاریخی در معرض خطر و نرخ فرونشست در ابنیه‌های تاریخی هستیم که در ادامه‌ی تحقیق به آن‌ها پاسخ خواهیم داد (شکل 1).



شکل1. نمودار گردش کار

3. روش پژوهش

روش مورد استفاده برای انجام این تحقیق توصیفی - تحلیلی است. بدین منظور منابع داده‌ای مختلف مورد نیاز به همراه داده‌های میدانی و پیمایشی تهیه و پس از رقومی‌سازی، پردازش اولیه در محیط GIS صورت گرفته و در مرحله بعدی به کمک همین نرم افزار اقدام به استخراج نرخ و دامنه فرونشست شده است. در این روش می‌توان نرخ فرونشست را در ابعاد سانتی‌متر تعیین و دامنه آن را با دقت متر مشخص کرد. در ادامه با تعیین نواحی در معرض نشست و دسته بندی آن‌ها بر اساس نرخ بیان شده، اقدام به انجام شناسایی ابنیه‌های در معرض خطر ناشی از این پدیده شد. سپس با تحلیل داده‌های نقشه‌ای و پیمایشی، عکس برداری و مشاهدات میدانی روند تبدیل پدیده به مخاطره و احتمالاً فاجعه تبیین شده و در نهایت قابلیت‌پذیری رویداد فاجعه احتمالی در بسترهای نا امن برای ابنیه تاریخی و بافت اطراف آن را معرفی می‌نماییم.

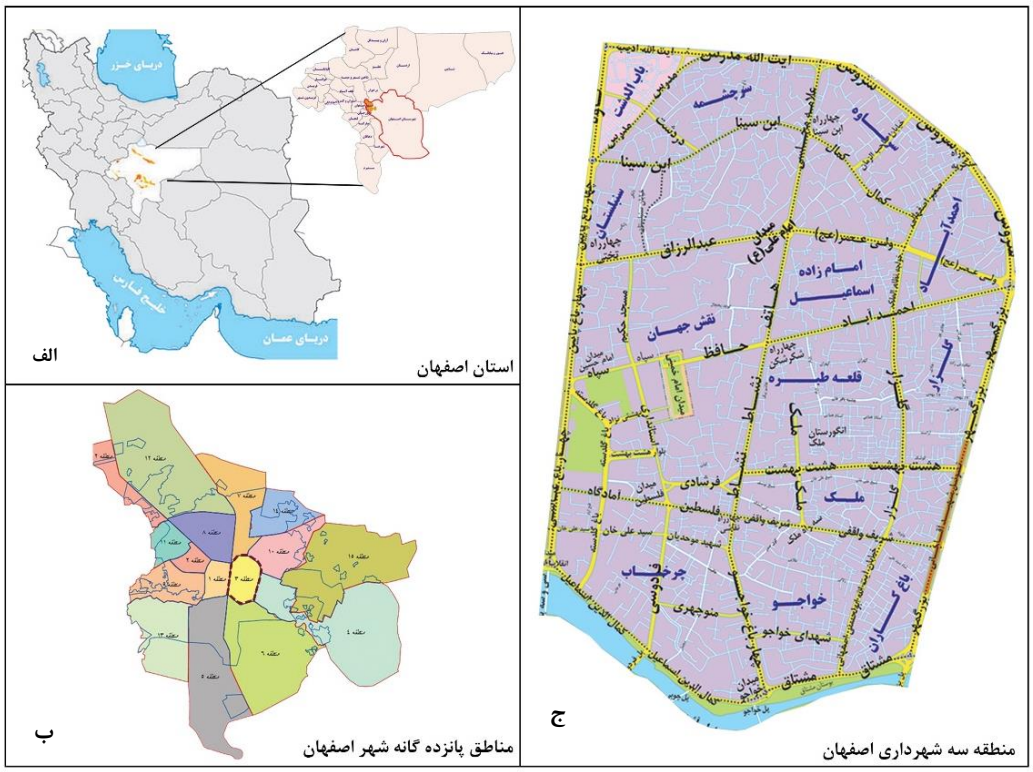
در راستای انجام این پژوهش حجم قابل توجهی از داده‌های رقومی و آنالوگ مورد نیاز خواهد بود که عمده آن مشتمل بر منابع اسنادی شامل نقشه‌های موضوعی (زمین شناسی و توپوگرافی)، تصاویر سنجش از راه دور، تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های پیمایشی و همین طور مشاهدات میدانی است. در این پژوهش همچنین از نظرات و تحلیل‌های کارشناسان و متخصصان در زمینه فرونشست، زمین‌شناسی و پدیده‌های مورفیک ناشی از فرونشست استفاده گردید و روند تبدیل این پدیده به مخاطره و احتمالاً فاجعه برای ساکنین و همین طور ابنیه تاریخی این منطقه و رویداد فاجعه احتمالی در آینده در بسترهای نا امن بعدی را معرفی می‌نماییم.

4. داده‌ها و اطلاعات

شهر اصفهان در 32 درجه و 38 دقیقه و 30 ثانیه عرض شمالی و 51 درجه و 39 دقیقه و 40 ثانیه طول شرقی، در مرکز ایران قرار گرفته است. ارتفاع آن بین حداقل 1550 متر در اطراف زاینده رود و تا حداکثر 2232 متر واقع در کوه صفه متفاوت می‌باشد. اصفهان شهری تاریخی و نیمه بیابانی است که در مرکز ایران قرار گرفته است. شهرستان اصفهان با مساحتی حدود 15774/389 کیلومتر مربع بعد از تهران و مشهد سومین شهر بزرگ ایران است [10].

علت پیدایش شهر را باید مدیون آب‌هایی دانست که از کوه‌های زاگرس مرتفع به نام زردکوه بختیاری سرچشمه گرفته و زاینده رود را به وجود آورده‌اند و شهر زیبای اصفهان در دو طرف آن قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه سومین منطقه اصفهان(شکل2) از شمال به فلکه شهدا در مسیر خیابان مدرس تا میدان قدس و خیابان سروش تا میدان احمد آباد منتهی می‌شود. میدان احمد آباد تا میدان بزرگمهر در شرق این منطقه قرار دارد. منطقه سه در جنوب به حاشیه زاینده رود از میدان بزرگمهر تا میدان انقلاب منتهی می‌شود. طبق آخرین سرشماری نفوس و مسکن جمعیت این منطقه بالغ بر111896 نفر و مساحت 1100هکتار و 33107 تعداد خانوار می‌باشد [11].

محور شرقی - غربی مجاور زاینده رود نیز در این دوره با جذب فعالیت‌های تفریحی - تجاری مثل پارک، هتل‌ها، پاساژها، نقش مهم‌تری در کالبد شهر یافت. احداث دانشگاه به عنوان یک عنصر شاخص شهری در انتهای چهارباغ، عناصری چون مهمان‌سرا و پاساژ عباسی در مجاورت عناصر قبلی، مانند مدرسه چهارباغ و راسته‌ی بازار که از طریق خیابان‌های مجاور با مجموعه‌های قدیمی مثل هشت بهشت و میدان نقش جهان مرتبط می‌گردد، خود باعث تقویت هر چه بیش‌تر محور شمالی - جنوبی چهارباغ شده است. بررسی عناصر اقلیمی در منطقه سه اصفهان نشانگر آن است که در چند سال گذشته میانگین حداقل دما 6.6- درجه سلسیوس و میانگین حداکثر دما 40/8 سلسیوس بوده است. بارش‌ها بیشتر به صورت باران بوده و ماهانه به طور میانگین 90/1 میلی‌متر و 16/9 میلی‌متر در یک روز بارندگی وجود دارد [11].



شکل2. الف)موقعیت جغرافیایی منطقه سه در استان اصفهان، ب) موقعیت جغرافیایی منطقه سه در مناطق پانزده گانه شهر اصفهان، ج) موقعیت جغرافیایی منطقه سه شهرداری اصفهان

5. زمین شناسی عمومی اصفهان

محدوده اصفهان، دشت اصفهان و دشت برخوار (دشت اصفهان - برخوار) در زون ایران مرکزی و در مجاورت شرقی با زون ارومیه - دختر قرار دارد. سنگ‌های موجود در ناحیه‌ی اصفهان مربوط به پرکامبرین تا عهد جدید است [12].

رخنمون‌های قدیمی‌ترین سنگ‌های پرکامبرین که در باختر اصفهان قرار دارد شامل شیست و سنگ‌های آندزیتی دگرگون شده می‌باشد. این وضعیت در محدوده شهر اصفهان و بخش جنوبی دشت اصفهان برخوار به این صورت است که جوانترین سازندها در این محدوده متعلق به دوره کواترنر و قدیمی‌ترین آن‌ها مربوط به رخنمون‌های سنگی شامل شیل‌های سیاه با میان لایه‌های آهکی متعلق به دوران تریاس است که بیشتر در نواحی غربی و جنوبی محدوده رخنمون دارند. در این گستره بیرون‌زدگی‌های محدوده مورد مطالعه عموماً دارای منشا رسوبی می‌باشند. سازندهای ژوراسیک از نظر زمان رسوب‌گذاری با تقسیمات زمین شناسی دوره شمشک در چینه شناسی البرز همزمانی دارد. شیل و ماسه سنگ با میان لایه آهک آمونیت‌دار که وابسته به لیاس می‌باشد، بیشتر شیلی بوده و دارای میان لایه‌های ماسه سنگ می‌باشد. این سازندها از نظر هیدروژئولوژی سنگ بستر آبخوان زیرزمینی را در بخش وسیعی از محدوده مطالعاتی در برگرفته به طوری که در جنوب شهر اصفهان و حوالی کوه صفه برونزد دارد. این سازندهای شیلی در سطح دارای درز و شکستگی بیشتری بوده و به تدریج با حرکت به سمت عمق از میزان شکستگی‌ها کاسته و تراکم رسوبات افزایش می‌یابد [13].

دو رشته کوه مهم (زاگرس در جنوب باختری و کهرود در شمال خاوری) در نقشه زمین شناسی منطقه قرار گرفته است و با این که روند هر دو رشته یکسان است، از نظر زمین شناسی ساختمانی ویژگی‌های مختلفی دارند. در باختر اصفهان سنگ‌های قدیمی پرکامبرین به علت جنبش‌های بایکالی دگرگون و سخت گردیده و به صورت پی سنگ ناحیه می‌باشند که بعداً به وسیله جنبش‌های اپیروژنی بالا آمده و تشکیل یک بالا آمدگی در حوضه کنونی زاینده رود (در باختر ناحیه) داده است [13].

مطالعات در شهر تاریخی مثل شهر اصفهان که بافت قدیمی شهر دارای اهمیت جهانی است و نگهداری از آن در اولویت است، چند برابر می‌شود. از طرفی حتی مطالعاتی که در اعماق کم زمین در محدوده شهر اصفهان صورت گرفته وجود یک لایه رسی ضخیم را نشان می‌دهد (شکل3) که در صورت افت شدید آب، پتانسیل نشست زمین را دارا می‌باشد. مطالعات اخیر وجود لایه‌هایی با قابلیت ایجاد نشست و شکاف در اعماق زیادتر زمین در اثر برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد [14].

در مطالعات هیدروژئولوژی با استفاده از :

1- گمانه‌های اکتشافی ویژگی‌های هیدرولوژیکی آبخوان (ضریب ذخیره و قابلیت انتقال آبخوان) تعیین می‌گردند و هم چنین لاگ‌های زمین شناسی حاصل از حفاری این چاه‌ها برای شناخت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه‌های زمین شناسی استفاده می‌شوند.

2- از بررسی‌های ژئوفیزیکی برای شناخت ضخامت لایه‌های مختلف زمین در گستره یک محدوده استفاده می‌شود و در واقع مکمل مرحله قبل است.

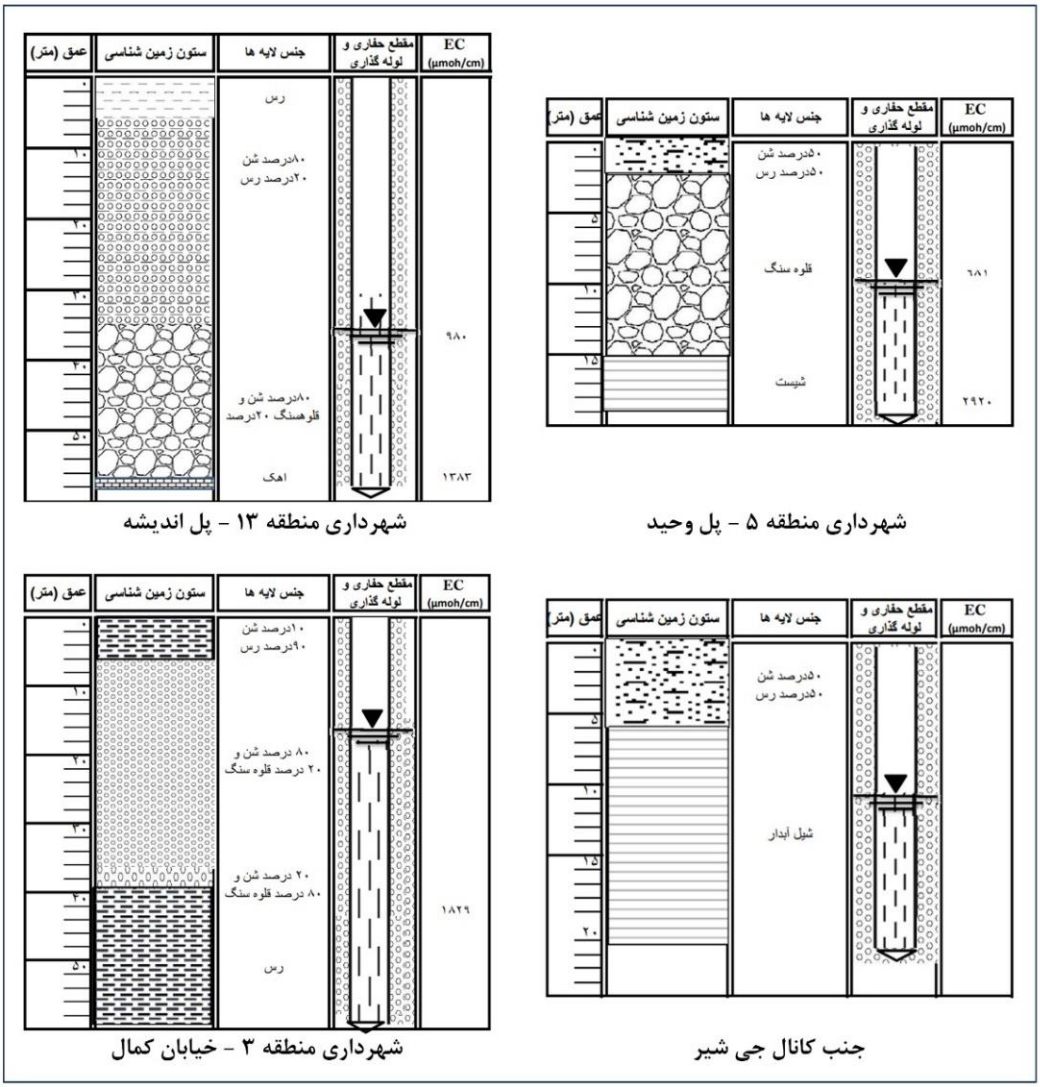
3- از حفاری چاه‌های مشاهده‌ای علاوه بر شناخت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه‌های زمین شناسی برای اندازه گیری نوسانات سطح آب در دراز مدت، تهیه نقشه‌های هم عمق، هم تراز سطح آب و مقاطع خروجی و ورودی آب زیرزمینی استفاده می‌شود [14].

همان طور که در لاگ زمین شناسی چاه‌ها مشاهده می‌شود (شکل3) آبخوان در محدوده شهر اصفهان را می‌توان به صورت دو آبخوان مجزا در نظر گرفت:

1 - در قسمت‌های جنوبی رودخانه زایندرود آبخوان آبرفتی بسیار کم ضخامت است و هر چه از محور رودخانه دور شویم از ضخامت آن کاسته می‌شود. آبخوان از شن و قلوه سنگ‌های نهشته شده از رودخانه و واریزه‌های ارتفاعات آهکی تشکیل شده است. ضخامت این نهشته‌ها از غرب به طرف شرق کاسته می‌شود. ضخامت آبرفت در حوالی پل اندیشه (اتوبان ذوب آهن) حدود 58 متر تا 15 متر در حوالی پل وحید تا کمتر از 2 متر در اطراف پل شهرستان متغیر است. در قسمت‌های غربی آبخوان جنوبی با توجه به رخنمون و لاگ چاه حفاری شده در پل اندیشه پی سنگ آهکی است و خطر فرونشست دور از انتظار نیست در قسمت‌های شرقی‌تر پی سنگ شیلی می‌شود [14].

2 - در قسمت شمالی رودخانه آبخوان با اسکلت آبرفتی متفاوتی تشکیل شده است که در نزدیکی رودخانه از نهشته‌های شن و قلوه سنگی تشکیل شده است و هرچه از محور رودخانه فاصله بگیریم نهشته‌ها ریزدانه‌تر و ضخامت آبرفت بیشتر می‌شود. در حوالی کانال جی شیر ضخامت آبرفت بسیار کم و پی سنگ شیل درز و شکاف‌دار است و توانایی کمی در ذخیره آب دارد. در حوالی خدمات شهرداری منطقه 9 از توالی لایه‌های رسی و شنی با نسبت‌های مختلف رس- شن تشکیل شده است. در این منطقه بعد از چند متر اولیه رس یک لایه حدود 30 متری شن و یک لایه ضخیم رسی که در قسمت‌های پایین آن مقدار شن زیادتر شده است، قرار دارد [14].

لاگ حفاری چاه واقع در منطقه شهرداری 8 توالی شن و رس را نشان می‌دهد. ابتدا یک لایه شش متری رس، یک لایه 18 متری شن با کمی رس، لایه 35 متری رس، یک لایه شنی و سپس ریگ با سیمان سست و سپس یک لایه ضخیم رسی 20 متری و در انتها لایه شن و ماسه رس‌دار قرار دارد. لاگ‌های حفاری چاه‌های واقع در مناطق شهرداری 3، 15 و 10 هم توالی شن و رس را نشان می‌دهد [14].



شکل3. الف) لاگ حفاری چاه شهرداری منطقه پنج پل وحید ، ب) لاگ حفاری چاه شهرداری منطقه سیزده پل اندیشه ج) لاگ حفاری چاه جنب پل جی شیر ، د) لاگ حفاری چاه شهرداری منطقه سه خیابان کمال

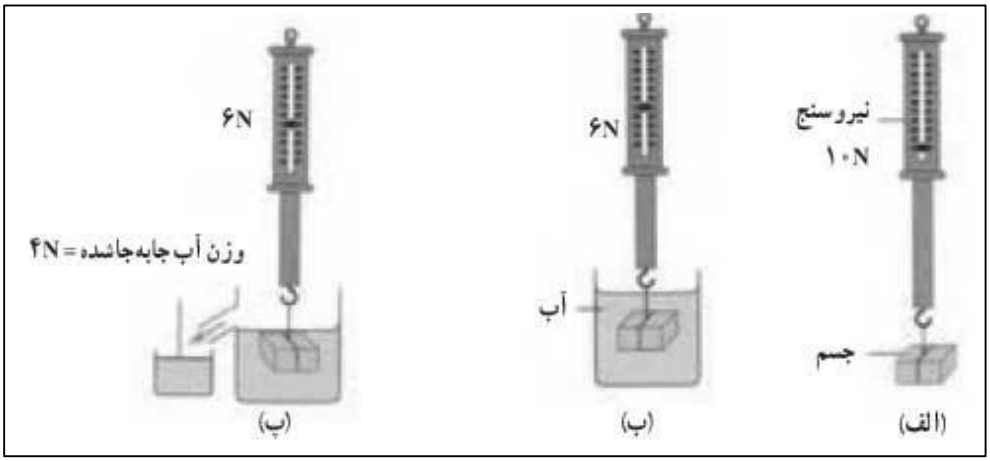
6. بحث

فرونشست زمین در سال‌های اخیر در بسیاری از دشت‌های ایران گزارش شده است. خشکسالی‌های اخیر به همراه افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی اصلی‌ترین دلایل افزایش تعداد دشت‌های در حال نشست در کشورمان می‌باشد. به طور کلی افت تدریجی یا ناگهانی زمین به تراز پائین‌تر در نتیجه‌ی جابجایی زیر سطحی مصالح زمین، فرونشست نامیده می‌شود. در حقیقت فرونشست، جابجایی و تغییر شکل خاک به صورت آنی و یا به مرور زمان می‌باشد. در ادبیات فنی، گاه دو پدیده فروریزش و فرونشست زمین، به دلیل تفاوت منشا آن‌ها، به صورت تفکیک یافته مورد بحث قرار گرفته‌اند. دو موضوع فرونشست زمین (حرکت بطئی رو به پائین سطح زمین) و فروریزش زمین (حرکت ناگهانی رو به پائین سطح زمین) با هم و ذیل عنوان کلی "فرونشست زمین" مورد توجه می‌باشند [14].

پائین رفتگی تدریجی و یا ناگهانی سطح زمین در گستره‌ای وسیع (پهنه‌ای) و یا محدود (به صورت نقطه‌ای یا خطی) در اثر عوامل طبیعی و یا غیر طبیعی را فرونشست زمین می‌نامیم. طبق این تعریف، عناوین فرونشست و فروریزش زمین، در ذیل عنوان "فرونشست زمین" جای می‌گیرند [13].

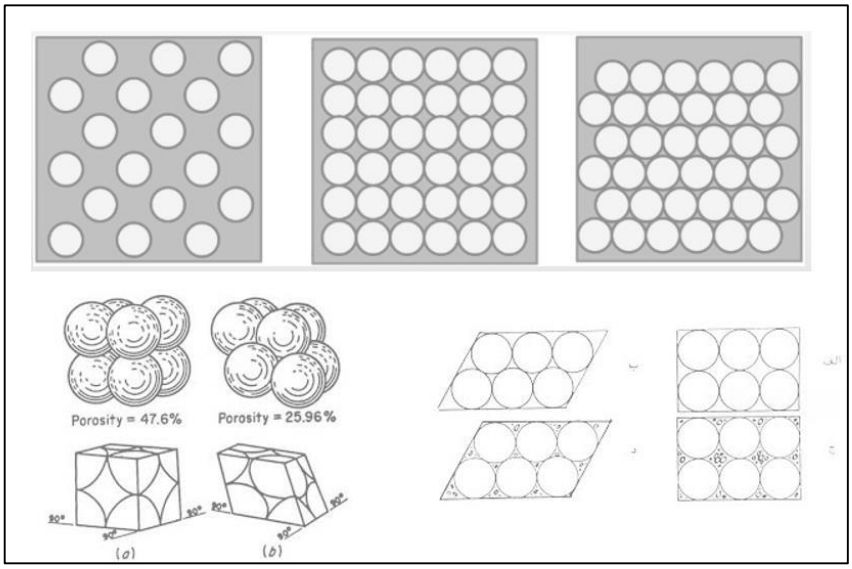
مجموعه مشاهدات میدانی، آنالیز داده‌های اندازه‌گیری شده و مدلسازی‌ها نشان می‌دهد که افت سطح آب زیرزمینی، عامل اصلی وقوع فرونشست زمین می‌باشد. علاوه بر افت سطح آب، دانه بندی نهشته‌های آبرفتی آبخوان و عمق قرارگیری لایه آبدار نیز در میزان و نرخ فرونشست زمین مؤثر هستند [13].

فشار حفره‌ای موجود در فضای بین دانه‌ای لایه آبرفت اشباع، موجب مقاومت آن لایه در برابر فشردگی ناشی از وزن لایه‌های فوقانی می‌گردد، در واقع مقاومت آب موجود در برابر نیروی وزن روباره‌ها و لایه‌های فوقانی آبخوان، نیروی مقاوم در برابر نیروی وزن است که از آن به فشار منفذی هم نام برده می‌شود (شکل4). علاوه بر آن وجود آب، اندازه بردار رو به پائین وزن را مطابق قانون ارشمیدس کاهش می‌دهد که نتیجه آن جلاگیری از فشردگی لایه در عمق و نشست تدریجی سطح زمین است [13].



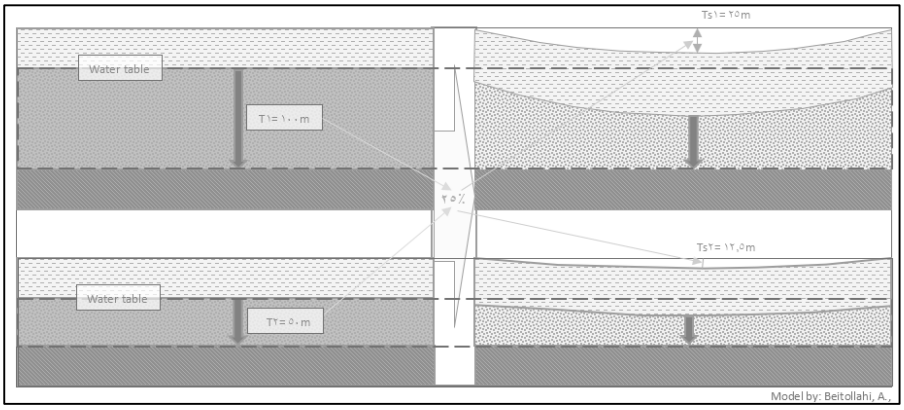
شکل 4. افزایش 60 درصدی نیروی وزن در اثر برداشتن آب (طبق قانون ارشمیدس، به اندازه وزن آب جابجا شده)

با افت سطح ایستابی، به تدریج فشار هیدروستاتیکی آب (فشار حفره‌ای) و مقاومت لایه در برابر نیروی وزن لایه‌های فوقانی برداشته شده و بخشی از لایه اشباع که آب خود را ازدست داده، شروع به تراکم می‌کند (شکل5). دانه‌های خاک به هم می‌چسبند و علاوه بر آن فرم قرارگیری آن‌ها به صورت طبیعی طوری تنظیم می‌شود که کمترین تخلخل و بیشترین تراکم را در طول زمان به خود بگیرد.



شکل 5. تراکم بخشی از لایه اشباع که آب خود را از دست داده است، فضای بین دانه بندی از بین رفته و فرم قرارگیری دانه‌ها نیز عوض می‌شود. در این حالت تخلخل قبلی تا 50 ٪ نیز کم می‌شود

نتیجه این فرآیند فرونشست زمین در سطح است که در کل موجب ایجاد انحنا کم شیب می‌گردد که به این دلیل با مشاهدات میدانی، قابل شناسایی نیست (شکل6). با استفاده از روش‌های دورسنجی (از روی تصاویر ماهواره‌ای مربوط به دوره‌های زمانی مختلف از یک منطقه مشخص)، استفاده از دستگاه‌های GPS و عملیات ترازسنجی می‌توان مقدار آن را محاسبه کرد [13].



شکل 6. بروز انحنای ملایم در سطح زمین با شکل‌گیری فرونشست زمین، هرچقدر ضخامت لایه آبداری و افت سطح آب در آن بیشتر باشد میزان تجمعی فرونشست زمین نیز بیشتر خواهد بود

برداشت بیش از حد مجاز از منابع آب زیرزمینی باعث ایجاد خلل و فرج در خاک می‌شود و زمین مانند اسفنجی که آبش را گرفته باشند پایین می‌رود و با ادامه فرونشست، آبخوان آن منطقه برای همیشه از بین می‌رود. لذا بنابر عقیده و هشدار کارشناسان پدیده فرونشست زمین در کشور در برخی موارد از زلزله نیز خطرناک‌تر است. زیرا حتی اگر سال پر آبی را در آینده تجربه کنیم دیگر امکان ذخیره آن وجود ندارد. خسارت‌های ناشی از فرونشست زمین عمدتاً شامل موارد زیر می‌باشد:

- تخریب سفره‌های آب زیرزمینی و عدم امکان ذخیره طبیعی آب در آبخوان
- ادخال آب‌های شور و شیرین
- تغییر شکل شبکه آبراهه‌ها به دلیل تغییر شیب رودخانه‌ها، کانال‌ها و آبراهه‌ها
- آسیب به شریان‌های حیاتی (پل‌ها، راه‌ها، خطوط راه آهن، مجاری و فاضلاب‌ها)
- خسارت به سازه‌های شهری و مسکونی
- خرابی پوشش چاه‌ها (Well Casings)
- خسارت جدی و جبران ناشدنی به نواحی صنعتی و کشاورزی
- ایجاد شکاف* زمین در ارتباط با فرونشست

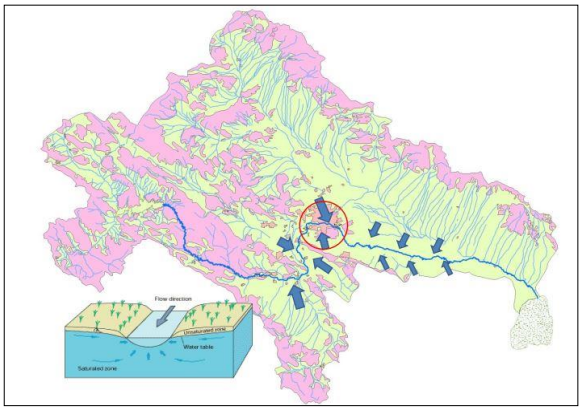
فرونشست زمین، اگر همگن باشد مهم‌ترین خطر ناشی از آن تراکم آبرفت و از بین رفتن تخلخل در لایه‌های آبدار پس از افت سطح ایستابی و در نهایت از بین رفتن توان ذخیره و پتانسیل گذردهی آب خواهد بود که در واقع و در هر حالت مهم‌ترین و اصلی‌ترین ریسک فرونشست زمین است. این ریسک از منظر دیگری هم حائز اهمیت است و آن غیرقابل برگشت بودن پدیده است، بدین معنی که اگر تحکیم لایه‌ای که آب خود را از دست داده، استمرار پیدا کند، امکان نفوذ آب و احیا آبخوان از دست می‌رود و درصد عمده‌ای از میزان تخلخل و مقدار ضریب انتقال آب که کاهش قابل ملاحظه پیدا می‌کنند، غیرقابل برگشت می‌شود. این پدیده اصلی‌ترین ریسک فرونشست زمین از منظر زیست محیطی و منابع آب است. کاهش فشار حفره‌ای (افت سطح آب زیرزمینی)، ضخامت آبخوان، تراکم پذیری (ریزدانه بودن) و نیز عمق قرارگیری آبخوان، پارامترهای اصلی مؤثر بر بروز و تشدید فرونشست زمین می‌باشند [13].

فرونشست زمین اگر متقارن نباشد و یا اگر افت سطح آب، خشکیدگی سطح و نشست زمین در پهنه‌هایی با خاک سطحی رخ دهد، شکاف‌ها (فیشرها) و حفره‌ها و فروچاله‌هایی در سطح زمین به عنوان آثار فرونشست زمین پدیدار می‌گردد که می‌تواند حادثه‌زا و خسارت بار باشد. کمیت عددی ناهمگنی و ناهمسانگردی فرونشست زمین،گرادیان نشست است. گرادیان نشست در مرز بین کوه و دشت، در نواحی با رلیف تند سنگ کف، در مرز بین دو محیط با دانه‌بندی متفاوت ریزدانه (نشست بیشتر) و درشت دانه (نشست کمتر)، در راستای گسله‌های شیب لغز با تغییرات جانبی ارتفاعی قابل ملاحظه می‌تواند وجود داشته باشد [13].

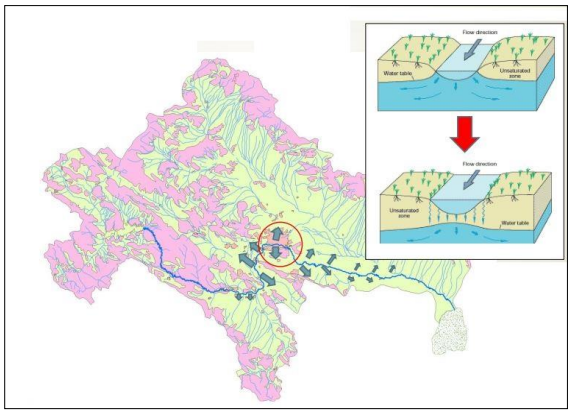
این پدیده مدت زیادی نیست که گریبان شهر اصفهان را گرفته و علاوه بر دشت‌های اصفهان اکنون به محدوده‌های مسکونی و بافت‌های تاریخی آن رسیده است. با توجه به رشد روند شهرنشینی و مهاجرت افراد از شهرستان‌های اطراف به این شهر، اهمیت آب را در این شهر در جهت تأمین آب شرب مصرفی، آب کافی برای کارخانجات صنعتی چون ذوب آهن و فولاد مبارکه، مصارف کشاورزی در مناطق غرب و شرق، دو چندان می‌کند.

* Fissure

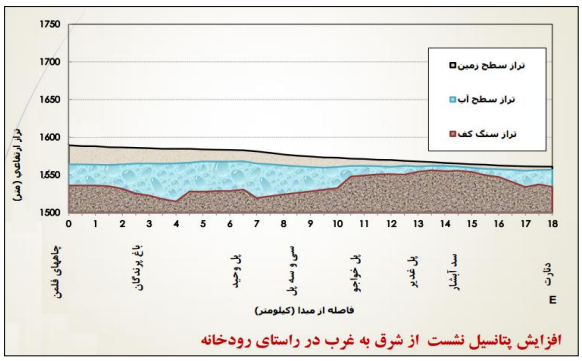
رودخانه زاینده رود تنها منبع آب سطحی در دشت اصفهان است و در زمان جاری بودن آن به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تغذیه آبخوان اصفهان به شمار می‌رفت که اکنون مورد بی‌توجهی مسئولین قرار گرفته و با سیاست‌های نادرست در جهت توزیع آب، دستخوش تغییر و نابودی قرار گرفته است (شکل 7 و 8) وضعیت آن قبل و وضعیت حال حاضر جریان را نشان می‌دهد.



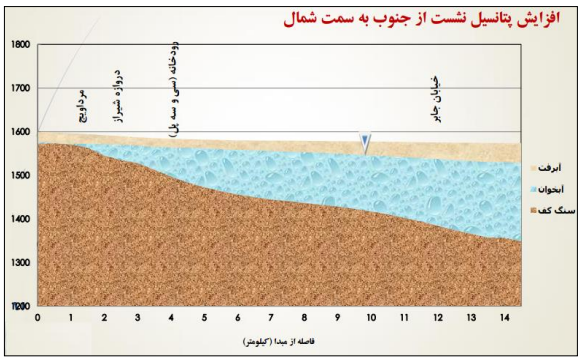
شکل 7. قبل از برداشت‌های بی رویه



شکل 8. وضعیت حال حاضر جریان



شکل 9. نیمرخ شرقی غربی آبخوان اصفهان



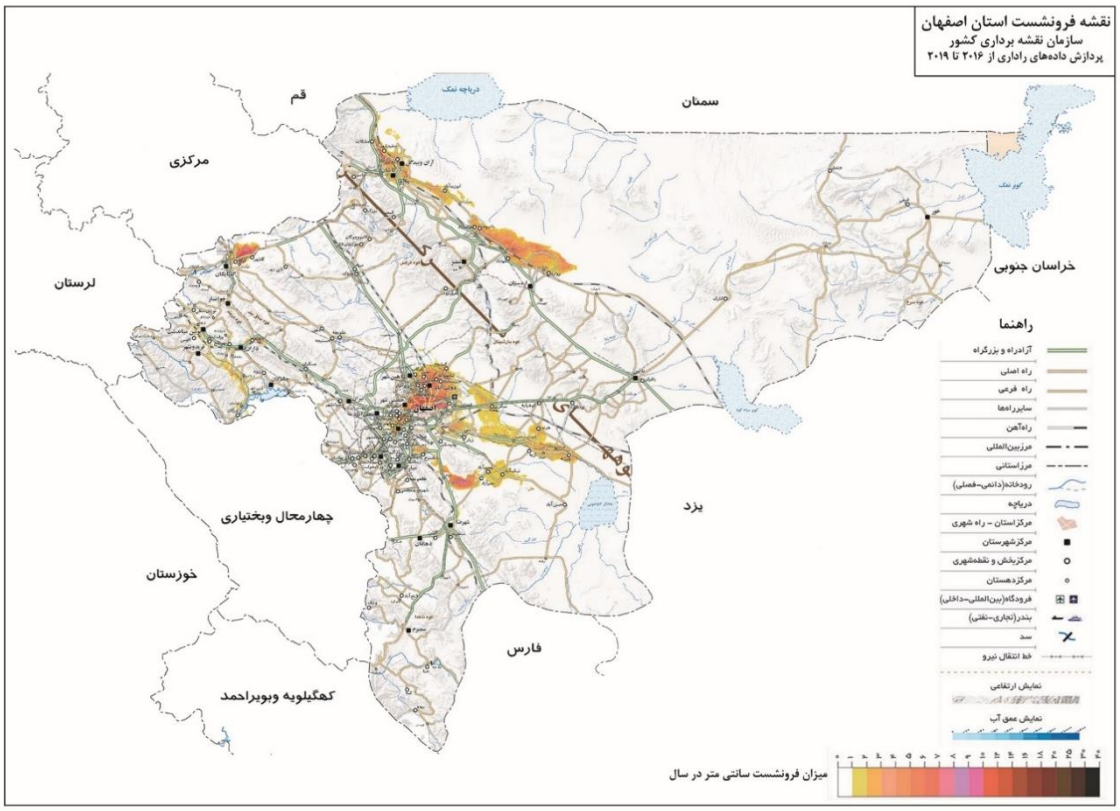
شکل 10. نیمرخ شمالی جنوبی آبخوان اصفهان

مطالعات انجام شده در مورد پدیده فرونشست در کلان شهر اصفهان بر اساس مطالعات میدانی و آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از 266 حلقه گمانه اکتشافی با عمق 7 تا 42 متر و نوسانات سطح آب بیش از 1000 حلقه چاه مشاهده‌ای در محدوده شهر اصفهان بررسی گردیده است [16].

بر اساس مطالعات ژئوفیزیک انجام شده عمق سنگ بستر اصفهان از حداقل 5 متر در جنوب تا بیش از 250 متر در ناحیه مرکزی و شمال اصفهان متغیر است. همچنین بر اساس داده های ژئوتکنیکی موجود، بافت اصلی آبرفتی دشت اصفهان از نهشته ریزدانه و رسی تشکیل یافته که در سمت شمال و شمال غرب شهر ضخامت آن افزایش می‌یابد. طبق نقشه‌ها و اطلاعات موجود افت سطح آب زیرزمینی در این منطقه به خصوص محدوده‌های چهارباغ پایین، میدان نقش جهان و میدان تختی در بازه زمانی (سال 73 تا 93) به طور متوسط حدود 11 تا 14 متر بوده است [16].

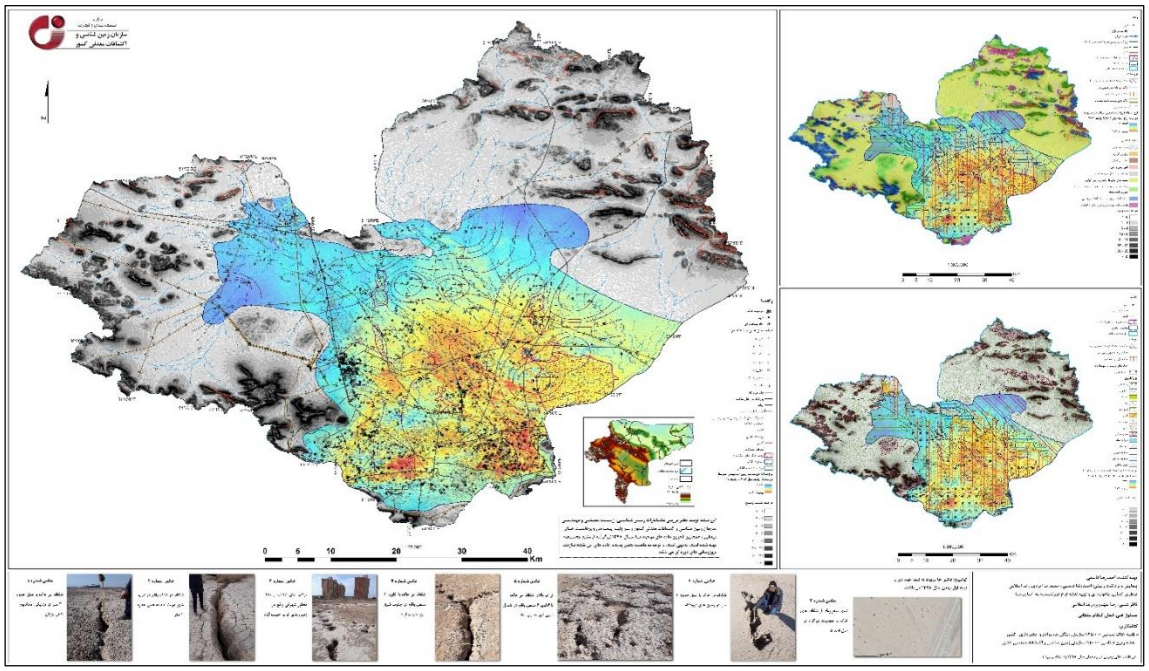
7. تحلیل و بررسی فرونشست اصفهان

با توجه به کاهش تراز سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی 14 ساله از سال (1393 تا 1379هجری شمسی) حداکثر میزان فرونشست مربوط به محدوده غرب و شمال غربی استان (شکل11) به میزان 73 سانتی‌متر می‌باشد که این مقدار نشست مربوط به محلی است که سطح آب زیرزمینی در آن افتی به میزان 29/3 متر داشته و جنس رسوبات در آن محدوده از نوع CH و CL می‌باشد [16].



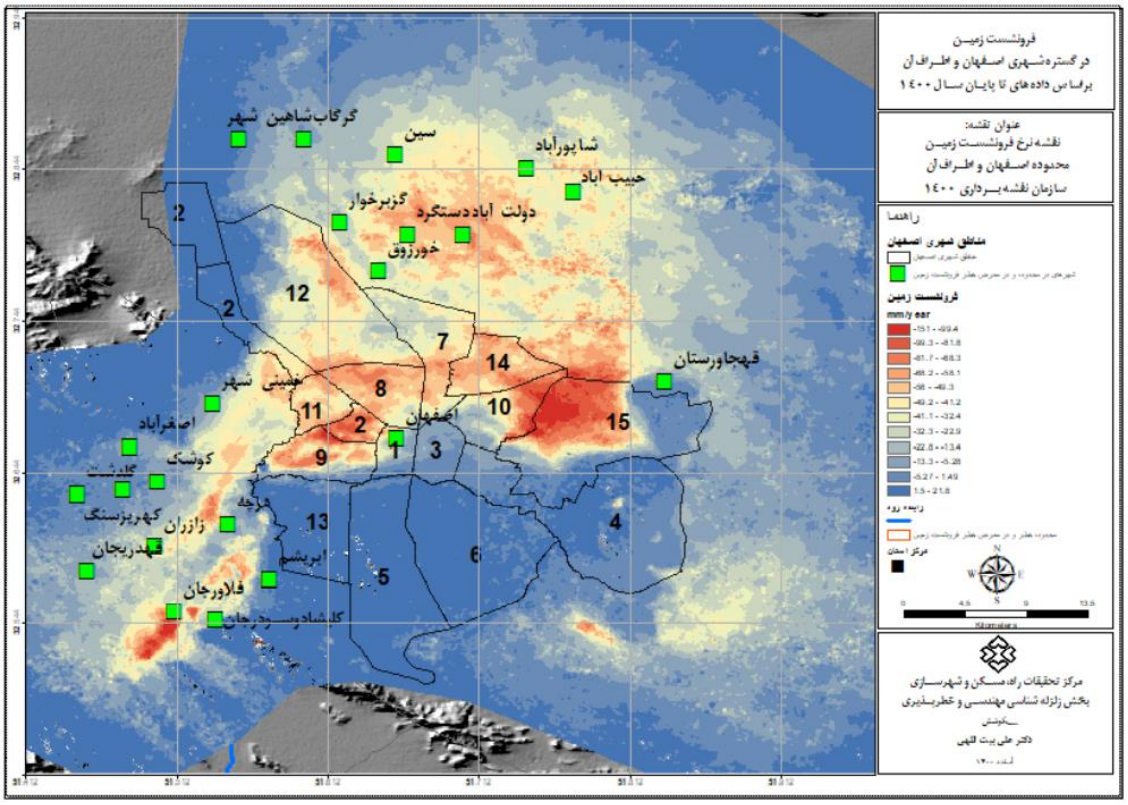
شکل 11. نقشه فرونشست استان اصفهان (سازمان نقشه برداری کشور)

در نقشه فرونشست اصفهان (شکل12) و محدوده مشترک شهرستان‌های خمینی شهر، شاهین شهر و میمه، برخوار، فلاورجان، لنجان و نجف آباد، که در سال‌های 1395 تا 1397 توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده، مشاهده می‌شود که دامنه نرخ کمینه فروشست صفر سانتی‌متر و نرخ بیشینه‌ی آن 18/4 سانتی‌متر در سال برآورد شده است. با توجه به پهنه‌های فرونشست در نقشه شهر اصفهان می‌توان تحلیل کرد که دامنه فرونشست در شهر اصفهان بدین صورت است که در محدوده‌ی غرب و جنوب غرب (از سمت فلاورجان) و همچنین در شمال و شمال شرق (برخوار - خوراسگان) به بیشترین نرخ خود رسیده است و در یک نوار شرقی – غربی (نواحی مرکزی) این میزان کاهش پیدا کرده و در بخش جنوب به کمترین حد خود رسیده است.



شکل 12. نقشه فرونشست اصفهان

در ارزیابی ریسک فرونشست زمین در اصفهان، نقشه نرخ فرونشست (شکل13) ارائه شده توسط سازمان نقشه برداری کشور (در سال1400) ملاک قرار گرفته است. در این نقشه، خطر فرونشست با اعداد نرخ سالانه فرونشست زمین بر حسب میلی‌متر در سال پهنه بندی شده است. زون‌هایی با نرخ بالای فرونشست در شمال اصفهان بصورت دو زون مجزا در حوالی دولت آباد و دستگرد در محدوده شمالی دشت برخوار و مناطق 15، 14، 7، 8، 2، 9 و11 در گستره شهری اصفهان مشاهده می‌گردد. بین این دو پهنه، نوار غربی - شرقی با نرخ نسبی پائین‌تر امتداد دارد. بدین صورت است که مسیر فرونشست به صورت یک زون کشیده جنوب غرب - شمال شرق از سمت فلاورجان و دو زون مجزا در محدوده‌ی شمالی دشت برخوار با نرخ حداکثری (99.4- تا 151) و یک نوار شرقی غربی بین دو زون دشت برخوار با نرخ حداقل (1.5 تا 21.8) در سال 1400 را نشان می‌دهد [17].



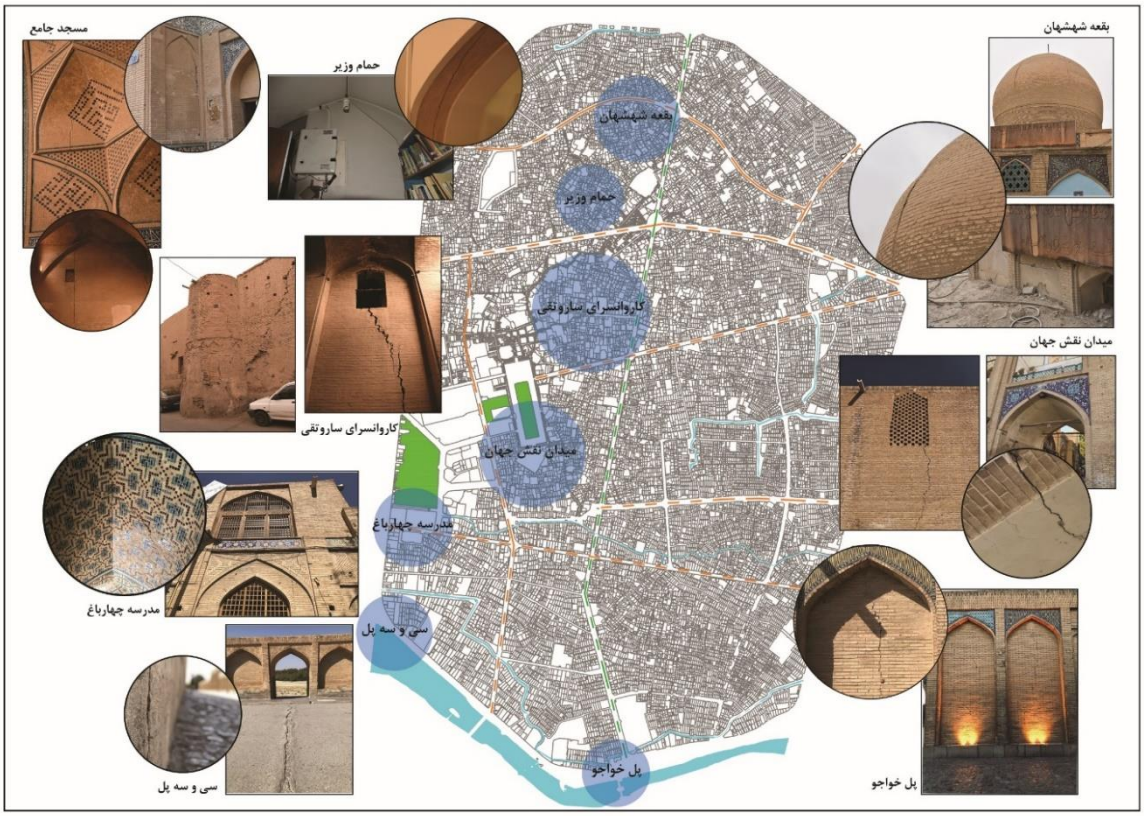
شکل13. نقشه نرخ فرونشست سالانه زمین(میلی‌متر بر سال) در محدوده اصفهان و اطراف آن سال1400

حال با توجه به آن که در نقشه فرونشست اصفهان در سال 1400 میزان نرخ فرونشست منطقه سه را با رنگ آبی و در طیف نرخ‌های پایین با عدد 13.3-8.29 سانتی‌متر نشان داده است، با بررسی و شواهد میدانی و آثار فرونشست بر روی ابنیه تاریخی این میزان بیشتر به نظر رسیده و می‌توان همبستگی زیادی بین نرخ‌های فرونشست در مناطق دیگر اصفهان با منطقه سه یافت و می‌توان نتیجه گرفت که فرونشست در این منطقه تحت اثر پذیری از محدوده‌هایی با نرخ بالای فرونشست قرار گرفته و در آینده‌ای نه چندان دور به میزان بیشتر خواهد رسید.

بررسی پدیده فرونشست در منطقه سه و به خصوص در مورد ابنیه تاریخی از آن‌جایی مهم به نظر رسید که در سال‌های اخیر گزارش‌هایی از ترک خوردن سازه‌ها و بناهای تاریخی در این محدوده رسید. شواهدی همچون طبقات خاک ریز دانه و وجود چند چاه آب بهره برداری فعال شهرداری و همچنین افت چشمگیر سطح آب زیرزمینی، گسترش ساختمان‌های محتمل نشست در بافت، ترک خوردگی دیوارها و نوظهور بودن این آسیب‌ها در ساختمان‌های این محدوده، شکل‌گیری پدیده فرونشست را نمایان ساخت.

این آثار تاریخی و بناهای باستانی در واقع بخش مهمی از تاریخ سرزمین ایران است، آثار تاریخی و باستانی گرانبهایی که به صورت بناهای ناپایدار، در معرض خطر فرونشست زمین قرار گرفته‌اند و ترمیم تخریب‌ها و آسیب دیدگی‌های احتمالی ناشی از این پدیده، بسیار مشکل و شاید ناممکن باشد.

منطقه سه علاوه بر جمعیت انسانی ساکن و مناطق مسکونی، دارای مراکز رفاهی، تجاری، اوقات فراغت و بناهای مهم توریستی گردشگری و ادارات دولتی می‌باشد. علاوه بر این سایر تأسیسات موجود در این نواحی شامل (خطوط مترو، خطوط لوله آب و گاز و غیره) از این مخاطره‌ی ژئومورفولوژیکی به دور نیستند و همواره با توجه به روند فرونشینی در آینده نه چندان دور دچار خسارت‌های زیادی خواهند شد. منطقه سه دارای درصد زیادی از بافت فرسوده و قدیمی هست که پدیده فرونشست با توجه به خسارت‌های مالی و تأسیساتی به عنوان یک عامل تهدید کننده و مخاطره آمیز برای آن‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود. تصاویر زیر (شکل14) از نقاط فرونشست منطقه طبق برداشت‌های میدانی و مصاحبه با افراد استفاده کننده از فضا و ساکنین محل به دست آمده و نشانگر رخداد فرونشست می‌باشد.



شکل14. نقشه فرونشست زمین در گستره منطقه سه شهرداری اصفهان سال 1401

کاهش رطوبت و ذخایر آبی لایه‌های زیرین قادر است موج ناشی از رخداد زمین لرزه را مخرب‌تر ساخته و فاجعه ایجاد کند. بدین سبب هم زمانی رویداد سانحه زمین لرزه در اراضی در معرض فرونشست می‌تواند نتایج ناشی از رویداد یک زمین لرزه غیر مخرب و یا نسبتاً مخرب را به یک زلزله خسارت بار و پر تلفات تغییر داده و فاجعه انسانی را به دنبال داشته باشد [18]. رخداد مخاطره فرونشست در سکونتگاه‌ها و بافت تاریخی علاوه بر ایجاد خسارات فراوان به ساختمان‌ها، تأسیسات و ابنیه زیبای تاریخی (شکل15 تا 18)، جمعیت‌های انسانی ساکن را نیز تهدید می‌کند.

شکل15. پل چوبی

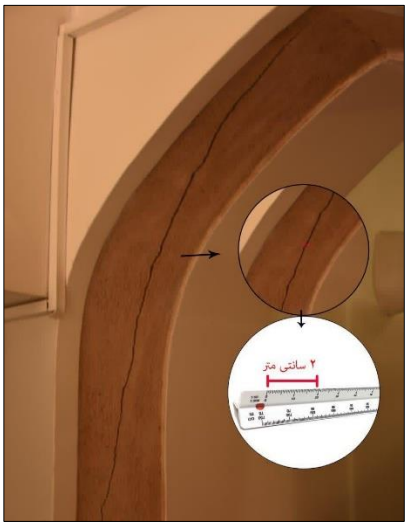
شکل 16. پل خواجو

شکل 17. پل خواجو

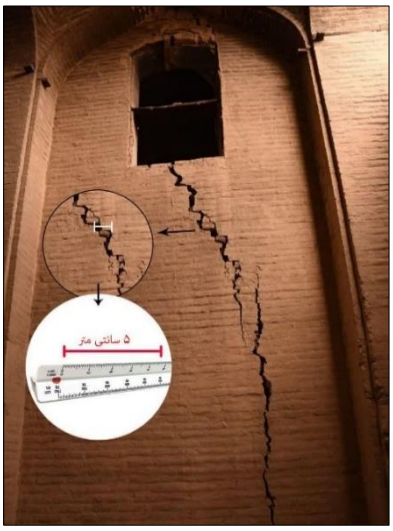
شکل 18. میدان نقش جهان

به نحوی که رویداد آن می‌تواند با ایجاد تلفات انسانی از طریق تخریب ساختمان‌ها به فاجعه تبدیل شود. فروریزش ناگهانی زمین و تخریب سازه‌های آسیب پذیر تاریخی از سوانح محتمل از عوارض فرونشست است که علاوه بر تلفات انسانی، هویت تاریخی و ارتباط عمیق عاطفی مردمان و تعلق خاطرات آن‌ها نسبت به آن مکان با فروریزش و تخریب آن از بین خواهد رفت. اکنون پهنه‌های در حال فرونشست اصفهان از سمت شمال به جنوب و همچنین در منطقه سه که به لحاظ تاریخی و قدمت آن حائز اهمیت است، افزایش یافته و در آینده‌ای نه چندان دور به نقاط مخاطره آمیز بدل می‌شود.

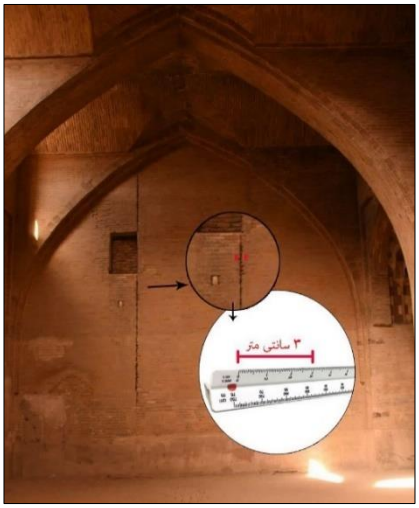
با توجه به اهمیت موضوع، ابنیه تاریخی موجود در این منطقه شناسایی و طبق مشاهدات میدانی، هر کدام از آثار به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و میزان فرونشست برروی ترک‌ها و شکاف‌های نامتقارن که به تازگی رخ داده است، اندازه‌گیری (اشل گذاری) شده که این میزان بین 2-5 سانتی‌متر در هر قسمت از ابنیه متفاوت و مشهود است (شکل 19 تا 22).



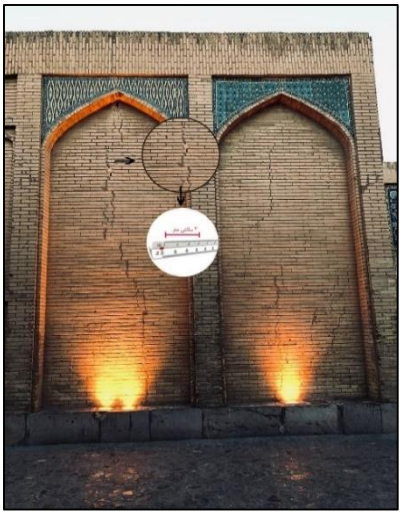
شکل 19. حمام وزیر



شکل 20. کاروانسرای ساروتقی



شکل 21- مسجد جامع



شکل 22. پل خواجو

8. نتیجه گیری

همانگونه که در مطالعات نشان می‌دهد در چند دهه اخیر توسعه کلانشهر اصفهان در بخش‌های مختلف تاریخی، تجارت، گردشگری، حمل و نقل، املاک و غیره رشد سریع و فزاینده‌ای داشته است. این توسعه سریع شهری، اثرات منفی جانبی از جمله تبدیل مناطق گسترده کشاورزی به مناطق مسکونی و صنعتی، اختلال قابل توجهی به عملکرد محیط زیست، آلودگی‌های زیست محیطی و غیره را باعث شده است. در بین مناطق شهری اصفهان، منطقه سه به عنوان منطقه‌ای با سابقه‌ی تاریخی زیاد و وجود بناهای تاریخی با ارزش و همین طور فضاهای سبز و اوقات فراغت، همچنین فعالیت‌های تجاری و وجود مراکز مهم اداری و دولتی شناخته می‌شود. در حال حاضر پدیده فرونشست یکی از اختلالات موجود خطرناک و رو به رشد در منطقه می‌باشد که نتیجه برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و تحمیل بار حاصل از فعالیت‌های انسانی است و جان ساکنان آن و همین طور ابنیه تاریخی و مهم آن را مورد تهدید قرار داده است. به طور کلی درز و شکاف‌های

ایجاد شده بر اثر پدیده فرونشست کالبد عناصر تاریخی، تأسیسات و ساختمان‌ها را با تهدید مواجه کرده است. در صورت عدم توجه و بی‌مهری مسئولین و دستگاه‌های دولتی مرتبط نسبت به این منطقه، بستری مناسب برای افزایش این خطرات فراهم گردیده و حوادث تلخ ناشی از این رخداد، پر هزینه و دردناک بوده و علاوه بر خسارات مالی تأثیرات منفی روحی و روانی و تعلق خاطر شهروندان را مورد خدشه قرار داده و آینده‌ای نا زیبا را برای آن رقم خواهد زد. فرونشست زمین در اصفهان، به طور ویژه و به چند دلیل مهم‌ترین چالش توسعه پایدار شهر اصفهان و سکونتگاه‌های اطراف است. پدیده فرونشست زمین، مخاطره‌ای گسترده و وابسته به عوامل متعددی است که ضرورت دارد در کاهش ریسک آن دیدگاه ملی و فرا استانی-شهری پایه کار قرار گیرد.

با عنایت به رخداد فرونشست سطح زمین در دشت اصفهان که کلانشهر اصفهان بخش عمده‌ای از آن می‌باشد، انجام مطالعات، پایش و ارائه راهکارها به منظور جلوگیری از اثرات ویرانگر این پدیده، یکی از پر اهمیت‌ترین موضوعات مدیریت بحران شهری محسوب می‌گردد.

9. پیشنهادات:

1. با توجه به وجود موارد متعدد فرونشست در منطقه، همچنین اهمیت ابنیه تاریخی و ملی، لزوم و شناسایی و کنترل و مدیریت این نقاط فرونشست امری ضروری به نظر می‌رسد، چرا که رویارویی با خطر فرونشست بر سه اصل پیش بینی، تشخیص و پایش استوار است.
2. احیا زاینده رود و مادی‌ها و جوی‌ها
3. اصلاح سبک اجرای نظام ارتفاعی شهر و گسترش طرح‌های توسعه جمعیتی
4. بازنگری در کاربری شصت هزار هکتار اراضی کشاورزی در بالادست سد زاینده رود در استان اصفهان
5. پایش و مانیتورینگ مداوم ابنیه‌ها و آثار تاریخی
6. توجه به پساب جهت تزریق به آبخوان‌داری شهری و آبخیزداری
7. ارائه راهکار مناسب جهت ساماندهی وضعیت مهاجرت به اصفهان
8. توقف طرح‌های توسعه صنایع آب‌بر و توجه ویژه به طرح آمایش سرزمین استان
9. توجه به بهسازی و باز آفرینی بافت‌های فرسوده شهری
10. توجه ویژه به حقابه محیط زیست و تالاب گاوخونی و تلاش برای احیا آن
11. تغییر و اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب و جلوگیری از ادامه فعالیت استفاده‌کنندگان غیر مجاز و چاهای حفر شده
12. جلوگیری از اجرای سیاست‌های اتخاذ شده در جهت خودکفایی شهر در امر کشاورزی و محول کردن این وظیفه به عهده‌ی مناطق و شهرهای دیگر
13. مدیریت و تصمیم‌گیری در بخش تغذیه و جریان دائمی رودخانه زاینده رود به عنوان بستر آبدهی به سفره‌های آب زیرزمینی و یک عنصر طبیعی و حیاتی
14. حفظ نقش شهر اصفهان به عنوان یک شهر توریستی-تاریخی و تأمین محصولات کشاورزی مورد نیاز آن از مناطق و شهرهای اطراف

مراجع

1- ایمانی، بهرام، جعفرزاده، جعفر. (1401). شناسایی روستاهای در معرض خطر فرونشست در دشت اردبیل با استفاده از تحلیل شبکه‌ای-فازی در سیستم اطلاعات جغرافیایی. *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، *13*(2)، 15-18.

2- Tzampoglou, P., Ilia, I., Karalis, K., Tsangaratos, P., Zhao, X., & Chen, W. (2023). Selected worldwide cases of land subsidence due to groundwater withdrawal. *Water*, *15*(6), 1094.

3- Liu, Y., Ma, T., & Du, Y. (2017). Compaction of muddy sediment and its significance to groundwater chemistry. *Procedia Earth and Planetary Science*, *17*, 392-395.

4- آمیغ پی، معصومه، عربی، سیاوش، طالبی، علی، جمور، یحیی. (1388).کاربرد تکنیک تداخل سنجی راداری در مطالعات مناطق فرونشست،همایش ژئوماتیک 88،تهران.

5- جبرائیلی اندریان، ناصر و نوری سنگراب، ثریا و اصغری مقدم، اصغر. (2023). بررسی پتانسیل فرونشست دشت عجب شیر با استفاده از مدل های هوش مصنوعی و تکنیک تداخل سنجی راداری.

6- سازمان مدیریت منابع آب ایران، www.wrm.ir

7- آقایار، محمدصادق، ملک پور، امیر، و شفیعی ثابت، بهنام. (1399). فرونشست ناشی از پمپاژ متغیر آب زیرزمینی در شرایط لایه بندی خاک با کاربرد تابع تاثیر و داده های سیستم اطلاعات جغرافیایی. مجله پژوهش آب ایران، 14(4 (39 پیاپی))، 153-162.

8- Chang Y. L. Tsai T. L. and Yang J. C. 2019. Flood hazard mitigation in land subsidence prone coastal areas by optimal groundwater pumping. Journal of Flood Risk Management. 12(2): 1-15.

9- آروین، عبدالخالق، وهابزاده کبریا، قربان، موسوی، سید رمضان، بختیاری کیا. (1398). مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، *10*(3)، 34-19.

10- سازمان هواشناسی کشور، www.irimo.ir

11- شهرداری اصفهان. (1400).گزارش بررسی و مطالعات مدیریت بهره برداری از منابع آب زیرزمینی شهر اصفهان.

12- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، www.gis.ir

13- بیت اللهی، علی. (1401). فرونشست زمین در اصفهان و اطراف آن. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

14- وزارت نیرو، سازمان آب منطقه‌ای اصفهان (1401). گزارش بررسی وضعیت وقوع پدیده فرونشست زمین در استان اصفهان.

15- صداقت، مرتضی. (1398). بررسی پتانسیل فرونشست زمین در شهر اصفهان و ارائه راهکار مناسب جهت جلاگیری از آن. پایان نامه دکتری، اساتید راهنما دکتر اکبر قاضی فرد، دکتر رسول اجل‌لوئیان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم.

16- مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، www.bhrc.ac.ir

17- سازمان نقشه برداری کشور، www.ncc.gov.ir

18- گزارش نشست و فرونشست حوزه‌ی حمل و نقل استان اصفهان،1397.

19- Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*, *778*, 146193.

20- Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., & Perissin, D. (2020). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, *181*, 104238.