

ارزیابی خطرپذیری فرونشست شهرستان لردگان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری

فرید امیری- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.
محمد مومنی - استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.
سهراب میراثی* - استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۱۵ تائید نهایی: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱

چکیده

مخاطره فرونشست می‌تواند عاملی در ایجاد تشدید آسیب‌پذیری کانون فعالیت‌های انسانی واقع در بسترهایی با زیرساخت مخاطره‌آمیز طبیعی همچون زلزله باشد. این پدیده در سال‌های اخیر آسیب‌های فراوان به دشت‌ها و شهرهای کشور و بخصوص به ساختمان‌های مسکونی، دشت‌ها و زمین‌های کشاورزی واقع در استان چهارمحال و بختیاری وارد نموده است. لذا پایش میزان فرونشست و پرداختن به علل تأثیرگذار آن در راستای کنترل و مدیریت خطرپذیری آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تاکنون روش‌های متنوعی همچون استفاده از جی‌پی‌اس، تراز یابی ابزار دقیق و روش تداخل سنجی راداری برای اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده شده است. در این میان، روش تداخل سنجی راداری، تکنیکی به‌روز و مؤثر برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین در سطح دنیا است. این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین در بازه‌های مختلف زمانی می‌باشد. در این مقاله، برای سنجش خطرپذیری فرونشست دشت لردگان و سکونتگاه‌های شهری از داده‌های ماهواره‌ای و به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شده است. بدین منظور میزان فرونشست در یک دوره زمانی ۶ ساله (از ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های سنتینل ۱A در محیط نرم‌افزار SNAP ارزیابی شده است. نتایج مشاهدات صحرایی و ارزیابی‌های انجام شده حاکی از آن است که رخداد فرونشست و به تناسب افت سطح آب در اثر استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی بوه است. داده‌های به دست آمده از چاه‌های پیژومتری شهرستان لردگان و چشمه برم نشان از افت شدید سطح آب زیرزمینی از سال ۸۶ به بعد می‌باشد این میزان افت آب در بعضی مناطق تا ۱۵ متر مشاهده شده است. نتایج حاصله از داده‌های راداری نشان داد در طی یک دوره ۶ ساله شهرستان لردگان میزان نشست در حدود ۱۴ تا ۱۸ سانتی‌متر را تجربه نموده است این مقادیر نشست به تناسب سالانه حدود ۳ سانتی‌متر می‌باشد که در حد هشدار و فراتر از حالت نرمال است. با توجه به نرخ قابل توجه مخاطره فرونشست و آسیب‌هایی که این پدیده ممکن است ایجاد نماید، مدیریت صحیح برداشت آب زیرزمینی امری ضروری به نظر می‌رسد. فاجعه‌بارترین وضعیت محتمل برای این منطقه، هم‌زمانی سانحه نشست زمین با زمین‌لرزه است. چنین فاجعه‌ای به دلیل قرار گرفتن در گسل فعال زاگرس که هر ساله شاهد آزاد شدن انرژی و تحرکات این گسل فعال می‌باشیم دور از انتظار نیست.

واژگان کلیدی: فرونشست، لردگان، تداخل سنجی راداری، چشمه برم، افت آب.

مقدمه

طبق تعریف سازمان زمین شناسی ایالت آمریکا^۱، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست تدریجی روبه پایین سطح زمین است که می‌تواند به هر دو علت طبیعی یا در اثر فعالیت بشر (مصنوعی) ایجاد می‌شود. فرونشست زمین یک پدیده زمین‌شناسی است که موجب پایین رفتن آرام سطح زمین می‌شود (هو و همکاران^۲، ۲۰۰۹). در دهه های اخیر حالت تصاعدی این پدیده همراه با اوج صنعتی شدن، شهرنشینی شدن و پمپاژ بی رویه از آبهای زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی مشاهده شده است. برداشت بی رویه از منابع زیرزمینی یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد پدیده فرونشست سطح زمین می‌باشد زمانی که آب، گاز یا نفت از لایه های پایینی برداشت می‌شوند سبب تقلیل فشار در لایه های زیرین و به تناسب فشار سربار ناشی از لایه های بالایی موجب کاهش حجم در لایه های پایینی و نشست و وسیع در سطح زمین می‌گردد. افزایش روزافزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی، دریایی کم‌ژرفا یا دریاچه‌ای تحکیم نیافته انباشته‌شده‌اند، در مناطق مختلفی از کشور ایران، مانند فارس، مشهد، نیشابور، کرمان و کاشمر موجب فرونشست زمین شده است. (امیغ پی و همکاران^۳، ۲۰۰۸)، (رهنما و میراثی، ۲۰۱۶)، (میراثی و رهنما، ۱۴۰۰)، (رهنما و میراثی، ۲۰۱۴).

پدیده فرونشست به علل گوناگونی از جمله عوامل طبیعی مانند زلزله، آتش فشان، فعالیت‌های گسلی، فرونشست ناشی از بالا آمدن سطح دریا، انحلال در سنگ، اکسایش، فشردگی رسوبات آلی، توسعه‌ی چاه در زمین‌های کارستی، یا ناشی از فعالیت‌های انسانی، شامل برداشت بی‌رویه‌ی سیالات از زمین نظیر آب، نفت و گاز روی می‌دهد فرونشست منطقه‌ای زمین به دلیل افت سطح آب زیرزمینی عمدتاً در رسوبات تحکیم نیافته یا نیمه تحکیم یافته که در مجاورت لایه‌های شن و ماسه قرار دارد صورت می‌گیرد. به عبارتی افت سطح ایستایی باعث کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش مؤثر وارد بر رسوبات آبخوان می‌شود (صالحی و همکاران، ۲۰۱۳).

فرونشست یکی از بلاهای طبیعی می‌باشد که خسارات زیادی به زندگی انسان و اکوسیستم‌های طبیعی وارد می‌آورد و با دیگر حوادث طبیعی از قبیل سیل، طوفان و زلزله تفاوت‌هایی دارد. عمده این تفاوت‌ها در تأثیر تدریجی آن طی یک دوره نسبتاً طولانی، عدم امکان تعیین دقیق زمان شروع و خاتمه و وسعت جغرافیایی تأثیر آن می‌باشد. در سال‌های گذشته فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در اغلب دشت‌های ایران سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان به زمین‌های کشاورزی، ساختمان‌های مسکونی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و دیگر سازندها شده است همچنین باعث تغییر کیفیت آب زیرزمینی، پیشروی جبهه آب شور، تهی شدن سفره‌های آب زیرزمینی، آسیب‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی شده است. البته فرونشست زمین اضافه بر خسارت‌های غیرقابل جبران زیست محیطی، زمینه ساز ناپایداری سازه‌ها و بناها شده و می‌تواند نرخ خسارت‌های مالی و جانی پدیده‌هایی مثل زلزله را به طرز وحشتناکی افزایش دهد. این پدیده می‌تواند به خیابان‌ها، پل‌ها و بزرگراه‌ها آسیب وارد آورده، خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب را مختل کرده، به پی ساختمان‌ها آسیب رسانده و موجب ترک‌خوردگی در آنها شود. در این حالت سازه‌هایی که پی گسترده‌تر و ارتفاع بیشتری دارند آسیب‌پذیرترند. خطوط راه‌آهن، سدهای خاکی، تصفیه‌خانه‌ها و کانالها از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردارند. (میراثی و رهنما، ۱۴۰۲)، (میراثی و رهنما، ۱۳۹۵).

پیشینه تحقیق

در مقیاس جهانی، بحران افت سطح آب و خسارت‌های ناشی از آن در بین سال‌های ۱۹۷۰-۱۹۵۰ که هم‌زمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی بود به اوج خود رسید. از نمونه‌های پدیده فرونشست در نقاط مختلف جهان می‌توان

1. American Geological Institute

2. Hu et al

3. M. Amighpey et al

به نشست زمین به دلیل پمپاژ آب در ۳۵ سال گذشته در شهر بانکوک در تایلند اشاره نمود با حداکثر نشست سالانه ۱۲۰ میلی‌متر که در اوایل دهه ۱۹۸۰ گزارش گردیده است (فین-وج و همکاران^۱، ۲۰۰۶). از نمونه‌های دیگر می‌توان به نشست دشت ساحلی تسالونیک (شمال یونان) به میزان حدود ۱۰ سانتیمتر در سال، اشاره نمود (لارسن و همکاران^۲، ۲۰۰۱). این پدیده در نقاط مختلفی از جهان مانند شهر ونیز ایتالیا در فاصله سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۷۳ با نشستی حدود ۱۵ سانتیمتر (گمبولاتی و همکاران^۳، ۱۹۷۴)، مکزیکوسیتی، تایلند، ژاپن و آمریکا گزارش شده است همچنان که این پدیده در بیش از ۱۵۰ شهر جهان گزارش شده است (هو و همکاران^۴، ۲۰۰۴). در بخش‌های از شهر قاهره در مصر به علت رخداد شکاف‌ها در اکثر ساختمان‌ها و همچنین نشست‌های موضعی از روش‌های ژئوالکترونیک و آنکسار امواج لرزه‌ای جهت شناسایی لایه‌های خاک و موقعیت گسل و ناهنجاری‌های زیر سطحی استفاده شده است؛ که مشخص شده عمده دلایل آسیب‌های وارده ناشی از وجود خاک رس مارنی اشباع و وجود گسل در لایه‌ای زیر ساختمان‌های اجرا شده بوده است (آرافا و همکاران^۵، ۲۰۱۴). یکی از مهم‌ترین خسارت‌ها و افت سطح آب در جهان در اثر بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی در ایالت کالیفرنیا در آمریکا گزارش شده است تا سال ۱۹۶۹ مقدار نشست در این ایالت ۸ متر گزارش گردید (پولند و همکاران^۶، ۱۹۸۱). بیش از ۸۰ درصد فرونشست‌های شناسایی شده در ایالات متحده ناشی از تأثیر انسان روی آب‌های زیر سطحی، که اغلب به دلیل نادیده گرفتن عواقب زیست محیطی ناشی از استفاده نادرست از آب و زمین می‌باشد. در ایالات متحده، بیش از ۱۷۰۰۰ مایل مربع در ۴۵ ایالات، به طور مستقیم توسط فرونشست تحت تأثیر قرار گرفته‌اند (سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده و همکاران^۷، ۲۰۰۵).

در ایران اولین بار فرونشست زمین در دشت رفسنجان در سال ۱۳۴۶ همراه با پدیده لوله زایی در چاه‌های کشاورزی مشاهده شده است (سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده و همکاران، ۲۰۰۵). روند نابودی منابع آبی کشور در سال‌های اخیر سبب شده است که اغلب دشت‌های کشور با یکی از پرمخاطره‌ترین پدیده‌های زیست محیطی روبرو شوند. در سال‌های اخیر پدیده فرونشست منطقه ای زمین در ارتباط با افت سطح آب‌های زیرزمینی در بسیاری از دیگر دشت‌های کشور از جمله در دشت‌های استان کرمان، یزد، چهارمحال و بختیاری، فارس و تهران و غیره گزارش شده است (میراثی، ۲۰۱۲)، (هو و همکاران، ۲۰۰۴). به عنوان نمونه در دشت رفسنجان به ازای هر ۱۰ متر افت سطح آب زیرزمینی، سطح زمین حدود ۴۲ سانتی‌متر نشست می‌نماید (عباس‌نژاد، ۱۳۷۷). در منطقه سیرجان به ازای هر ۱۰ متر افت سطح آب، نشست حدود ۲۷ سانتی‌متر گزارش گردیده است (حسینی میلانی، ۱۳۷۳). رهنما و میراثی (۲۰۱۴) در بررسی ژئوتکنیکی فرونشست زمین به این نتیجه رسیدند که در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی و توسعه بی‌رویه عوامل اساسی شامل افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۳ متر، ضخامت زیاد آبرفت دشت متشکل از لایه‌های ضخیم رس، تغییر ضخامت لایه‌ها در دامنه کوه‌ها و هم‌راستا بودن ترک‌ها و شکاف‌های ایجاد شده با راستای گسل موجود در محدوده مورد بررسی، باعث فرونشست زمین در این مناطق شده‌اند. با بررسی مطالعات صحرائی انجام شده و لحاظ کردن عوامل مربوطه نشست حدود ۳۵ سانتی‌متر به دست آمده است که با مشاهدات صحرائی همخوانی دارد. آتشی و همکاران (۱۳۹۶)، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و از طریق سنجنده TerraSAR-X طی دوره شش ماهه به مطالعه شواهد و تأثیرات مورفولوژیکی مخاطره فرونشست بر تاسیسات و ساختمان‌های مسکونی منطقه ۱۹ شهری تهران

1. Phien-wej et al

2. Larson et al

3. Gambolati et al

4. Hu et al

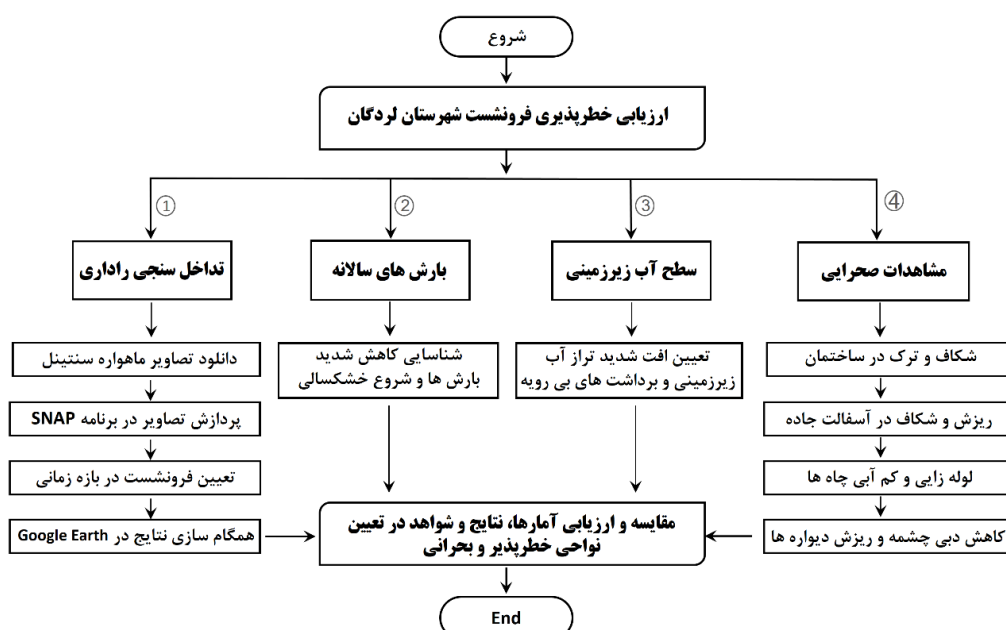
5. Araffa et al

6. Poland et al

7. USGS (United States Geological Survey)

پرداختند نتایج حاصل از آن فرونشستی به میزان ۵ سانتی متر در دوره زمانی ۶ ماهه بوده است. آنها به منظور تایید یافته ها اقدام به بازدیدهای میدانی نمودند و نتایج حاصل از این پیمایش شناسایی و ثبت عوارضی چون شکستگی های سطحی و عمقی، تخریب چاه های آب و فرونشینی کف و آسیب هایی به تاسیساتی چون پل، بزرگراه ها، تیر برق، تاسیسات آبی و گازی، خطوط مترو و مساکن در پهنه های فرونشست بوده است. روزبان و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی فرونشست زمین در دشت رفسنجان با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری و با به کارگیری تصاویر سنجیده سنتینل پرداختند و نرخ فرونشست در این دشت را حداکثر ۲۸ سانتی متر در سال به دست آوردند. شریفی کیا (۱۳۹۱)، به بررسی تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری در دشت نوبه‌رمان به این نتیجه رسید که مقایسه میزان فرونشست با ارقام تغییرات تراز آبی مستخرج از چاه‌های پیژومتری نشان می‌دهد در این دشت هر ۳/۲ متر افت تراز آبی قادر است فرونشستی به میزان ۱ سانتی متر ایجاد کند. افضلی و همکاران (۱۳۹۲)، به ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و سکونت‌گاه‌ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان پرداختند و نشان دادند که فرونشست در منطقه حدود ۷ سانتی متر در سال بوده است. به منظور تشخیص و کنترل مناطق فرونشست از روش‌هایی همچون تداخل سنجی راداری، GPS و ترازبایی دقیق استفاده گردید که روش تداخل سنجی راداری با پوشش وسیع و قدرت تفکیک مکانی بالا در کنار GPS با قدرت تفکیک زمانی بالا و ترازبایی دقیق با دقت بالا، می‌تواند منبع مناسب و به‌روزی برای بررسی حرکات سطح زمین باشد.

نظر به اهمیت پدیده فرونشست سطح زمین در دشت های استان چهارمحال و بختیاری و بخصوص شهرستان لردگان، در این مقاله، به ارزیابی خطرپذیری شهرستان لردگان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای SENTINEL-A1 و ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی پرداخته شده است. از جمله اهداف این پژوهش تعیین میزان فرونشست به روش تداخل سنجی راداری در محدوده شهرستان لردگان می باشد، همچنین با ارزیابی داده های بارش، پیژومترهای موجود در سطح دشت و شهر لردگان میزان افت سطح آب زیرزمینی مشخص گردید و در ادامه با انجام بازدیدهای میدانی وضعیت آسیب های نمایان شده در ساختمان ها، جاده ها و بخصوص سازه های اطراف چشمه برم این شهرستان مورد شناسایی قرار گرفت. در فلوچارت زیر روند انجام مقاله به منظور ارزیابی فرونشست شهرستان لردگان نمایش داده شده است (شکل ۱).



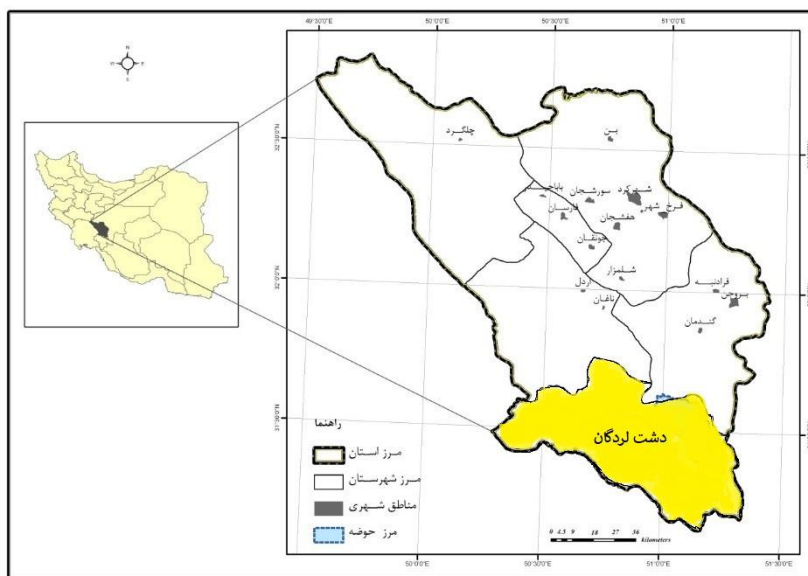
شکل ۱: فلوچارت روند ارزیابی خطرپذیری شهرستان لردگان در این مقاله

بحث و بررسی

روش تداخل سنجی راداری اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین را در امتداد خط دید ماهواره انجام می‌دهد. به دلیل این‌که عمده تغییرات سطح زمین در فرونشست به صورت تغییرات ارتفاعی است، می‌توان جابه‌جایی‌های استخراج‌شده به روش تداخل سنجی راداری را با صرف‌نظر کردن از تغییرات افقی سطح زمین، با تصویر کردن آن‌ها در راستای قائم، به تغییرات ارتفاعی تبدیل کرد. هر اینترفروگرام به‌طور مجزا فقط حاوی تغییرات سطح در یک بازه زمانی است. با به کار بردن تعدادی اینترفروگرام به همراه تجزیه سری زمانی می‌توان تغییرات سطح را در زمان موردبررسی قرارداد. تجزیه سری زمانی با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، روشی مناسب برای برآورد نرخ تغییرات سطح زمین در قدرت تفکیک مکانی بالا است. با در دست داشتن دو تصویر با بازه‌ی زمانی متفاوت از تصاویر ماهواره‌ای، با روش تداخل سنجی راداری می‌توان میزان نرخ فرونشست و خطرپذیری یک منطقه را در هر نقطه و تاریخ محاسبه کرد. قابل ذکر می‌باشد که تکنیک تداخل سنجی راداری از به‌روزترین و دقیق‌ترین ابزار برای محاسبه نرخ تغییرات سطح زمین در دنیا بوده و در سراسر دنیا در حال استفاده می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

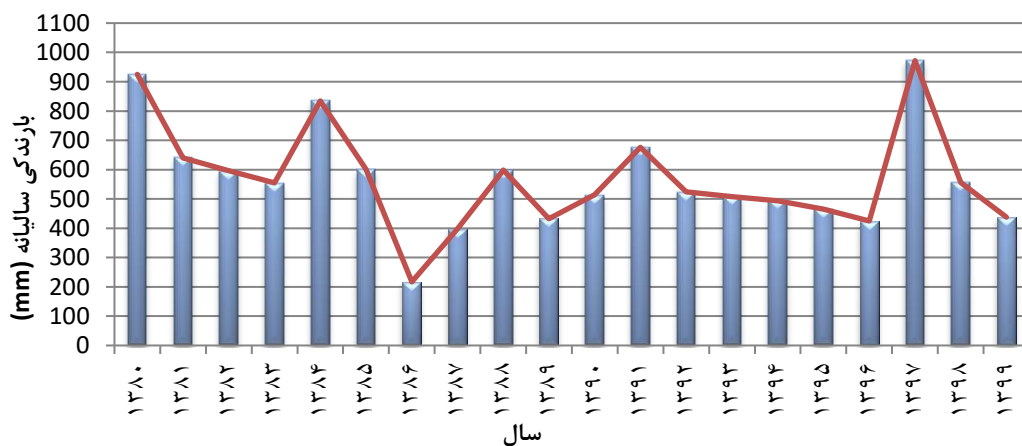
استان چهارمحال و بختیاری یکی از پر بارشترین و پرآب‌ترین استان‌های کشور با بیشترین تعداد چشمه‌های طبیعی و آب‌های زیرزمینی هست؛ اما وضع دشت‌های چهارمحال و بختیاری اکنون مطلوب نیست و برخی از آن‌ها ممنوعه اعلام شده‌اند. سوری و همکاران (۱۳۸۹)، بررسی هیدروگراف معرف آبخوان و نقشه‌های هم‌اُفت آب زیرزمینی نشان می‌دهد که با توجه به افت سطح ایستابی و کسری مخزن، دلیل اصلی ممنوعه اعلام کردن دشت‌ها است و چنانچه دشت ممنوعه با پدیده فرونشست روبرو شود آن دشت ممنوعه و بحرانی اعلام و برداشت آب در آن با محدودیت مواجه می‌شود. شهرستان لردگان در جنوب استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است (شکل ۲) و دومین شهرستان از نظر جمعیت و وسعت در استان می‌باشد. حوضه لردگان نسبت به دیگر مناطق استان پایین‌ترین حوضه نسبت به دریا و منطقه‌ای گرمسیری است و به دلیل بارش باران و کوه‌پایه‌ای بودن سربعاً بارش‌ها از منطقه خارج شده و این کار باعث می‌شود سطح آب‌ها زیرزمینی آن به صورت کامل تأمین نشود. آبخوان دشت لردگان در جنوب استان چهارمحال و بختیاری، در زون ساختاری زاگرس چین‌خورده و در زیر پهنه زون سمیرم واقع شده است. از نظر زمین ساختاری در این پهنه چین‌ها با روند SE-NW تاقدیس‌ها و ناودیس‌های منظمی را تشکیل می‌دهد. آبخوان لردگان یک آبخوان اُبرفتی آزاد با مساحتی بالغ بر ۷۶/۲ کیلومترمربع با حداکثر عمق در بخش‌های جنوبی و کمترین عمق در بخش‌های مرکزی می‌باشد که درون سازندهای آهکی آسماری واقع شده و از درون سازندهای کنگلومرای عبور کرده و با سازندهای تبخیری مجاورت دارد. آهنکوب و همکاران (۱۴۰۱)، با مطالعه کف دشت لردگان پی بردند که کف دشت لردگان شامل لایه‌های مارن و گچ مربوط به سازندهای گچساران و آغاچاری بوده که تشکیلات تبخیری آن‌ها در تغییر کیفیت آب سفره زیرزمینی و سنگی منطقه اثر نامطلوب دارد. هموگراف آبخوان لردگان دال برافزایش میزان شوری آب به‌مرورزمان می‌باشد. لیتولوژی منطقه، قابلیت انحلال کانی‌ها و سنگ‌های منطقه، وضعیت تکتونیک و خشک‌سالی سال‌های اخیر از عوامل مؤثر در کاهش کیفیت آب آبخوان دشت لردگان به شمار می‌روند.



شکل ۲: موقعیت شهرستان لردگان در استان چهارمحال و بختیاری

ارزیابی بارش ها و سطح آب زیرزمینی

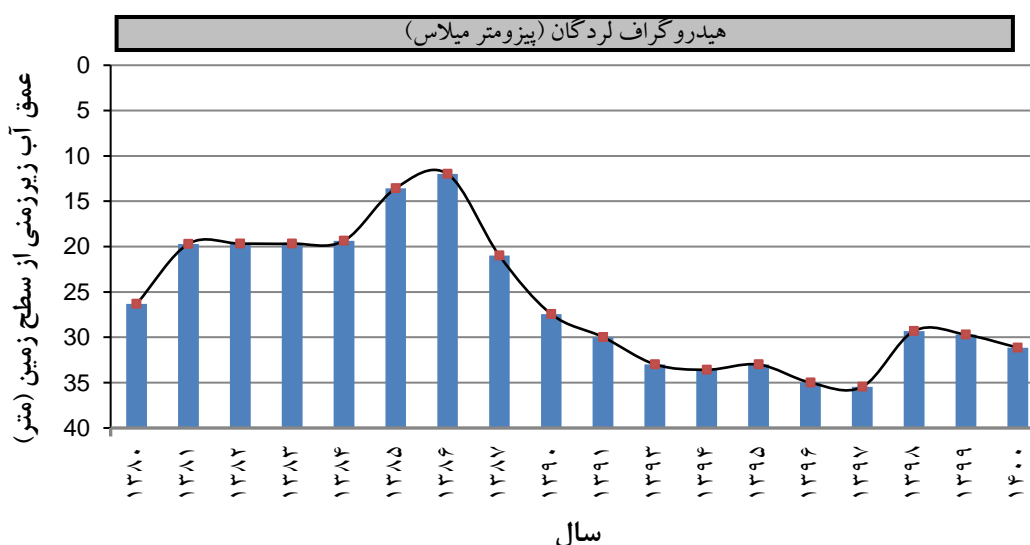
در دشت لردگان برای بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی از ۱۰ حلقه چاه مشاهده‌ای استفاده شده است. حفر چاه مشاهده‌ای از سال ۱۳۶۷ شروع شده و اندازه‌گیری عمق آب زیرزمینی در آن‌ها ماهیانه صورت می‌گیرد. آهنکوب و همکاران (۱۴۰۱)، بر طبق این موضوع روند کلی جهات جریان از جبهه‌های جنوبی دشت به سمت مناطق مرکزی و شمال غربی دشت می‌باشد. تراز سطح ایستابی برای تعیین جهات جریان آب زیرزمینی، تشخیص منابع تغذیه و تخلیه، محاسبه شیب هیدرولیک، تعیین جبهه‌های ورودی و خروجی آب زیرزمینی بکار می‌رود. بررسی وضعیت افت آب‌های زیرزمینی در نقاط مختلف دشت دال بر بیشترین مقادیر افت در مناطق جنوبی دشت می‌باشد. مطابق نمودارهای بارش سالیانه و هیدروگراف‌های نقاط مختلف دشت لردگان مشاهده می‌گردد که کاهش بارش‌ها و افت سطح آب زیرزمینی از سال ۸۵ و ۸۶ شروع شده‌اند. هرچند که میزان بارش‌ها کاهش ملایم‌تری داشتند (شکل ۳) و در سال ۹۷ نیز بارش‌هایی در حد سال‌های گذشته رخ داده است ولیکن افت سطح آب زیرزمینی مختلف لردگان نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمودار بارش سالانه دشت لردگان

مطابق بررسی بعمل آمده از هیدروگراف های موجود در شهرستان لردگان، سطح آب زیرزمینی از حدود ۱۵ متر به عمق حدود ۳۳ متر افت داشته است و این یعنی سطح آب زیرزمینی از سال ۸۶ تا ۹۰ حدود ۱۸ متر و به عبارت دیگر سالانه ۴/۵ متر سطح آب درون چاه‌های مشاهده ای دچار افت شده است (شکل ۴). لازم به ذکر هست این تغییرات در برخی مناطق بیشتر نیز گزارش شده است.

همانطور که پیش تر اشاره شد چشمه برم در مرکز شهرستان لردگان قرار گرفته است. مطابق بررسی‌های انجام شده در خصوص چشمه برم شهر لردگان، هیدروگراف منطقه میلاس به لحاظ فاصله نزدیک با این چشمه انتخاب شده است و همانطور که مشخص هست مطابق دیگر مناطق دشت لردگان سطح آب زیرزمینی حدود ۱۸ متر در سال‌های ۸۶ تا ۹۰ افت داشته است (شکل ۴) و قطعاً می‌توان اظهار داشت این میزان افت سطح آب زیرزمینی تأثیر زیادی بر چشمه برم لردگان داشته است. عدم مدیریت درست در قبال حجم آب‌های زیرزمینی و استفاده بی‌رویه از آن برای مصارف خانگی، اراضی کشاورزی، صنعت پرورش ماهی و همچنین ساخت‌وسازهای سنگین در زمین‌های اطراف چشمه (به‌عنوان نمونه می‌توان به مصلاهی بزرگ امام خمینی (ره)) از عوامل تشدید کننده می‌باشند.



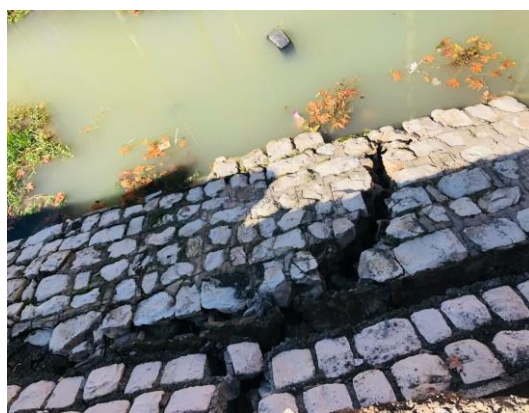
شکل ۴: هیدروگراف سطح آب زیرزمینی سالانه دشت لردگان

مشاهدات صحرایی و آسیب‌های رخ داده

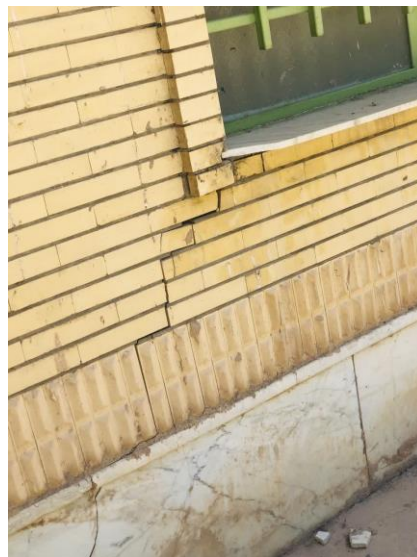
بازدیدهای میدانی انجام شده در شهرستان لردگان و بخصوص اطراف چشمه برم این شهرستان نشان دهنده وجود تعداد زیادی آسیب‌ها و ترک‌ها ناشی از فرونشست زمین در این منطقه می‌باشد. از جمله این رخنمون‌ها وجود خسارات زیادی در جاده‌های آسفالت در محدوده‌ی شهرستان می‌باشد، این ترک‌ها در سازه‌های محدوده شهری و نزدیک به چشمه و همچنین در زمین‌های کشاورزی پدیدار شدند و وجود این ترک‌ها در دشت و شهرستان نشان دهنده‌ی توسعه فرونشست در این منطقه می‌باشد به‌گونه‌ای که در سال‌های اخیر این آثار فرونشست در سطح شهرستان خسارت‌های بسیاری در پی داشته است.

از دیگر نمونه آسیب‌ها و شواهد وضعیت بحرانی و افت شدید سطح آب و فرونشست زمین می‌توان به ریزش دیواره‌های چشمه برم و ایجاد شکاف‌های متعدد در دیواره‌های اطراف چشمه اشاره نمود این دیواره‌ها در نزدیکی مصلاهی امام خمینی (ره) می‌باشند و به نظر می‌رسد ساخت سازه‌های سنگین و اعمال فشار و تنش، موجب تشدید تغییراتی در وضعیت تنش‌ها

و جریان‌های آبی زیرسطحی زمین در آن ناحیه شده است که باعث نشست بیشتر و فروریزش دیواره‌ها گردیده است (شکل ۵). سازه‌های اطراف چشمه برم نیز از دیگر نمونه‌های آسیب‌پذیر در محدوده مرکز شهر می‌باشند، که به عنوان نمونه می‌توان به ساختمان "کانون پرورش فکری کودکان" اشاره نمود که با مشاهدات میدانی و نزدیکی به چشمه مشخص گردید که در سالیان اخیر به دلیل کاهش دبی ورودی و خروجی چشمه و پایین آمدن سطح آب، به صورت همزمان ترک و شکاف در دیواره‌های اطراف چشمه برم پدیدار شده است (شکل ۶). فرونشست در سازه‌ها و ساختمان‌ها باعث از بین رفتن همبستگی در پی و فونداسیون شده و با ایجاد ترک در آن شرایط لازم برای تأثیر بیشتر شدت زلزله برسازه را فراهم می‌کند. لازم به ذکر است تا قبل از کاهش دبی و افت سطح آب چشمه، هیچ‌گونه شکاف و ترک و ریزشی در دیواره‌های اطراف چشمه مشاهده نشده بود.



شکل ۵: ریزش دیواره‌های اطراف چشمه برم نزدیک به سازه سنگین فلزی مصلا امام خمینی (ره) لردگان



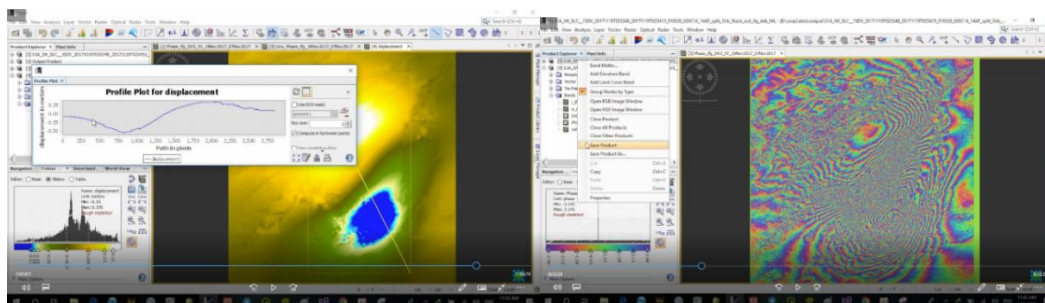
شکل ۶: ترک در سازه‌های نزدیک به چشمه و در محدوده مرکز شهرستان، مرکز کانون پرورش فکری کودکان

روش تداخل سنجی راداری

تصاویر راداری حاصل از رادارهای با روزنه مجازی (SAR) با دارا بودن قابلیت اندازه‌گیری طول بردار از سنجنده تا سطح زمین، در اندازه‌گیری‌های مربوط به تهیه نقشه رقومی ارتفاعی به‌طور گسترده به کار می‌رود (گابریل و همکاران^۱، ۱۹۸۹). تکنیک مورد استفاده در این روش به تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) ملقب است. در تداخل سنجی راداری، فاز حاصل از دو تصویر گرفته‌شده از یک منطقه معین جهت تولید تداخل نگار، تداخل داده می‌شود. در واقع، تداخل نگار حاصل ضرب مختلف دو تصویر راداری است. در روش تداخل سنجی تصاویر مختلط راداری که دارای مقادیر فاز برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند، با یکدیگر تلفیق شده و تصویری به نام تداخل نما تولید می‌شود. در واقع تداخل نما از اختلاف فاز دو تصویر اخذشده در دو زمان مختلف که از نظر هندسی به‌طور دقیق بر روی هم منطبق شده‌اند، به دست می‌آید (رابوگولس^۲ و همکاران، ۲۰۰۳). با استفاده از اطلاعات اختلاف فاز موجود در تداخل نما که نشان‌دهنده اختلاف فاصله‌ی بین سنجنده و عارضه است، می‌توان متغیر تغییر شکل سطح زمین یا توپوگرافی زمین تهیه کرد. در این پژوهش از تصاویر راداری باند C ماهواره سنتینل-۱A1 آژانس فضایی اروپا در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۲/۵ تا ۲۰۲۳/۰۱/۲۹ در سطح یک SLC و در مد IW با توان تفکیک بالا با پولاریزاسیون VV مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این در مرحله پردازش داده‌ها از زیر نوار IW1 و قطعه ۲ تا ۳ تصاویر استفاده شد.

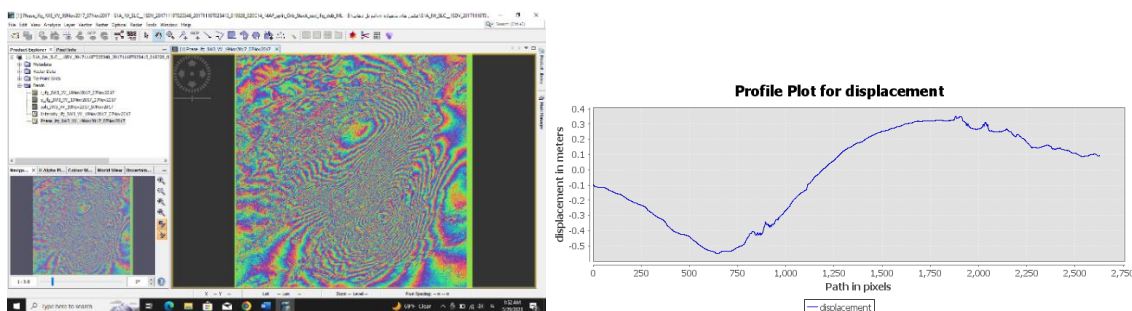
صحت سنجی

جهت بررسی و اطمینان از داده‌های به‌دست‌آمده و میزان دقت آن، پروسه صحت سنجی از طریق فایل‌های آموزشی سایت آکادمی سنجش از راه دور^۳ انجام شده است. در فایل آموزشی محدوده مورد بررسی، منطقه سرپل ذهاب بوده که از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۱ استفاده شده است. این داده‌های ماهواره‌ای از دو تصویر به تاریخ ۲۰۱۷/۱۱/۷ تا ۲۰۱۷/۱۱/۱۹ می‌باشند. به دلیل وقوع زلزله و تحرکات زمین این محدوده و این تاریخ انتخاب شده تا میزان نشست و برآمدگی‌ها به‌وضوح نشان داده شود. طبق بررسی‌های به‌دست‌آمده در پردازش داده‌ها در منطقه سرپل ذهاب قبل و بعد زلزله دچار تغییرات ارتفاعی زیادی شده است که می‌توانید میزان آن را از شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده فرمایید. نتایج فایل‌های آموزشی در شکل ۷ نمایش داده شده است و نتایج به‌دست‌آمده نرم‌افزاری از طریق دانلود تصاویر ماهواره و محاسبات انجام شده در این مقاله در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابق با پروفیل مکانی نشست به‌دست‌آمده حداکثر نشست رو به پایین به میزان حدود ۵۰ سانتی‌متر برای هر دو تحلیل حاصل شده که همخوانی قابل قبولی با یکدیگر دارند.



شکل ۷: نتایج نشست فایل آموزشی سایت آکادمی سنجش از راه دور

1. Gabriel et al
2. Raucoules et al
3. www.girs.ir



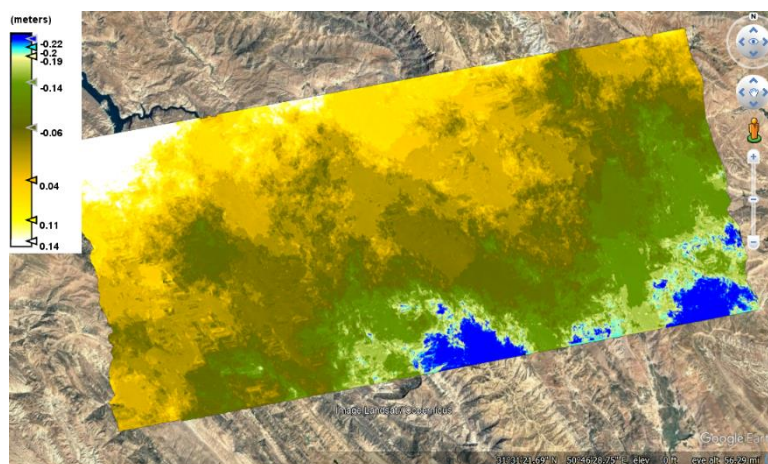
شکل ۸: خروجی نرم افزار و نتایج بدست آمده در این مقاله

نتایج روش تداخل سنجی راداری

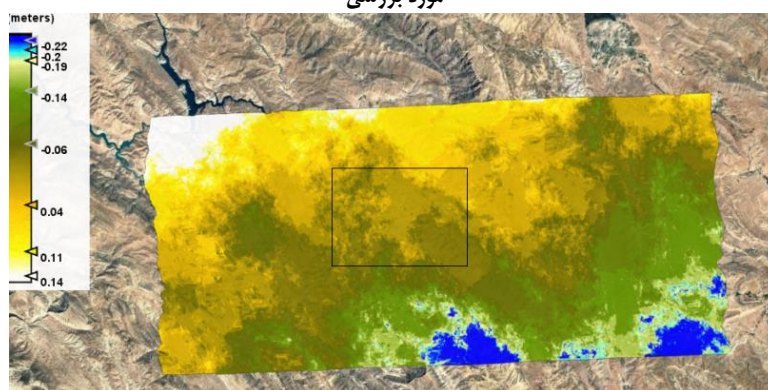
همان‌گونه که از مشاهدات میدانی و اطلاعات موجود از افت سطح آب‌های زیرزمینی شهرستان لردگان انتظار می‌رفت، پس از پردازش تصاویر راداری با استفاده از نرم‌افزار اسنپ، منطقه وسیعی از مرکز تا حاشیه‌های شهرستان دارای فرونشست بوده است. نتایج بدست آمده مطابقت نسبتاً خوبی با موقعیت چاه‌های منطقه دارند به طوری که میزان فرونشست بیشتر در مناطقی اتفاق افتاده که تراکم چاه‌های عمیق برداشت آب‌های زیرزمینی بیش از سایر مناطق مختلف است.

در شکل ۹ الف کل محدوده‌ی مورد مطالعه نشان داده شده که نشان از تنوع فرونشست و برآمدگی در این محدوده می‌باشد. در شکل ۹ ب محدوده‌ی شهرستان لردگان نمایش داده شده است که با توجه به میزان درجه‌بندی کنار تصویر نشان دهنده میزان مختلف فرونشست در کل سطح شهرستان هست. در کادر مربعی نشان داده شده در شکل ۹ ب میزان تغییرات فرونشست شهرستان لردگان در طی دوره‌ی ۶ ساله با رنگ‌های زرد (کمترین میزان فرونشست)، سبز کم رنگ (میزان نشست متوسط) و سبز پر رنگ (بیشترین میزان فرونشست)، قابل رویت می‌باشد. در اطراف منطقه‌ی مورد مطالعه رنگ‌های سفید، آبی کم رنگ و آبی پررنگ به ترتیب نشان دهنده بیشترین میزان فرونشست و رنگ سفید نشان دهنده برآمدگی در اطراف منطقه مورد بررسی می‌باشد. با توجه به شکل (۹ الف و ۹ ب) که نشان دهنده‌ی تنوع فرونشست و یکسان نبودن فرونشست در منطقه می‌باشد می‌توان گفت که بیشینه نرخ فرونشست سالیانه در کادر مستطیل شکل ترسیم شده که مربوط به شهرستان لردگان می‌باشد (شکل ۹ ب). میزان کل بیشینه فرونشست بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳، حدود ۱۸ سانتی‌متر بوده است که این میزان فرونشست سالانه حدود ۳ سانتی‌متر می‌باشد.

در ادامه نقشه هم‌پوشانی موقعیت جغرافیایی شهرستان با مشخصات طول و عرض جغرافیایی با نتایج فرونشست بدست آمده از داده‌های ماهواره‌ای در گوگل ارث نمایش داده شده است (شکل ۹ ج). تغییرات در سطح زمین به دلیل افت سطح آب زیرزمینی و تحرکات زمین ناشی از عوامل تحریک کننده آن، برآمدگی‌ها و فرونشست‌ها را می‌توان از شکل ۹ د که تصویر فاز یا همان تداخل نگاشت می‌باشد، مشاهده نمود که دال برادعای ما در مورد تغییرات در درون زمین در طی دوره‌ی ۶ ساله می‌باشد.



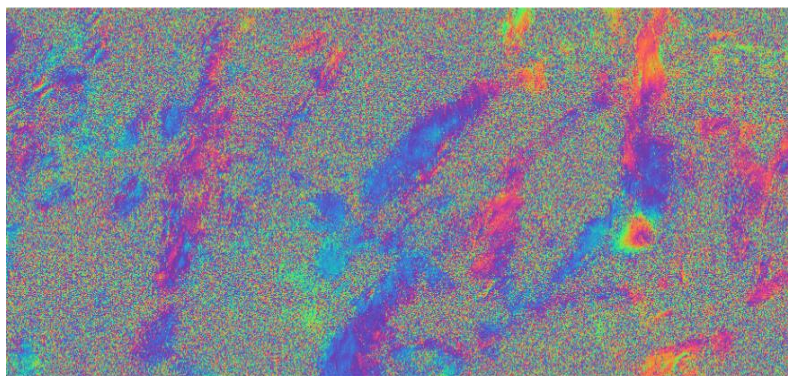
الف) اعمال خروجی نرم افزار SNAP در Google earth برای مشاهده دقیق تر میزان فرورنشست در منطقه مورد بررسی



ب) نشان دادن دقیق منطقه مورد مطالعه شهرستان لردگان با استفاده از کادر مشکی رنگ و همپوشانی با نتایج فرورنشست تداخل سنجی راداری با استفاده از خروجی نرم افزار SNAP و اعمال در برنامه Google earth



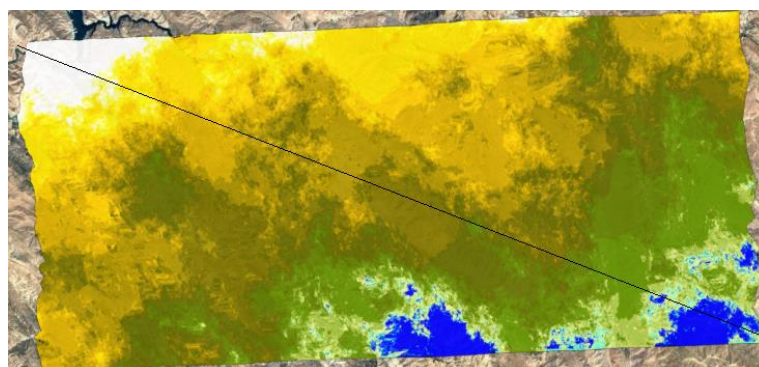
ج) موقعیت جغرافیایی شهرستان لردگان در طول و عرض جغرافیایی نمایش داده شده است



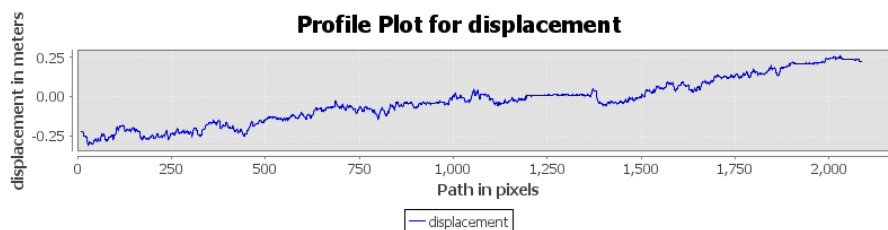
د) تداخل نگاشت در راستای دید ماهواره که پس از همگام سازی دو تصویر ماهواره ای با بازه های زمانی متفاوت در نرم افزار SNAP، نشان دهنده میزان تغییرات فرونشست و برآمدگی سطح زمین در آن بازه زمانی شده است.

شکل ۹: الف) کل منطقه مورد بررسی؛ ب) موقعیت شهرستان لردگان در کادر مستطیلی و میزان فرونشست؛ ج) موقعیت شهرستان لردگان در تصویر میزان فرونشست توسط نرم افزار Snap؛ د) تداخل نگاشت در راستای دید ماهواره، میانگین سالهای ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ در منطقه مورد مطالعه

در راستای نمایش بهتر تغییرات میزان فرونشست در سطح دشت، برشی به صورت قطری بر روی نقشه ایجاد شده است که از سمت جنوب شرقی به سمت شمال غربی امتداد یافته است (شکل ۱۰ الف). مقادیر فرونشست در تمامی نقاط روی این خط قطری (خط مشکی در شکل ۱۰ الف)، در شکل ۱۰ ب ارایه شده است. می توان اظهار داشت که بیشترین نشست به میزان ۲۵ سانتی متر مربوط به نواحی جنوب شرقی دشت و کمترین مربوط به شمال غربی دشت که دچار برآمدگی به میزان ۲۵ سانتی متر شده می باشد. همچنین نظر به موقعیت شهرستان لردگان که در شکل ۹ ب با کادر مربعی نشان داده شده فرونشستی حدود ۱۴ تا ۱۸ سانتی متر را می توان برای این شهرستان در نظر گرفت.



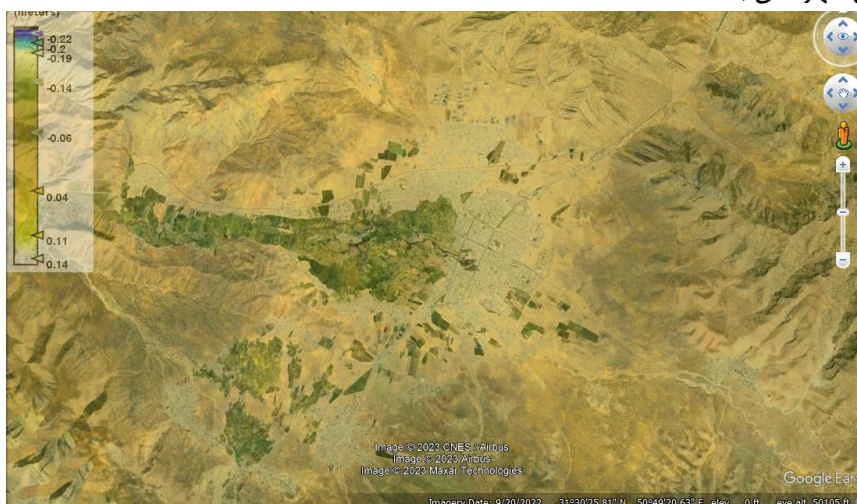
الف



ب

شکل ۱۰: الف) برش قطری جهت نمایش مقادیر فرونشست بر روی این خط؛ ب) نمودار تغییرات نشست بر روی خط قطری ترسیمی در شکل ۹ الف

از آنجایی که، وجود پوشش گیاهی در منطقه، به دلیل سطح زیر کشت بالا، موجب کاهش همدوسی بین زوج تصاویر راداری می‌شود، برخی از مناطق موجود در نقشه به صورت پیکسل‌های خالی دیده می‌شوند (شکل ۱۱). همچنین با توجه به کشت غالب روستاها و مزارع کشاورزی، مناطقی که کشت گندم بیشتری دارند، نسبت به مناطق شهری و سایر نقاط شهر میزان فرونشست بالاتری نشان دادند. که این امر به دلیل نیاز بیشتر این محصول به آبیاری و در نتیجه برداشت بیشتر آب‌های زیرزمینی در این شهرستان باشد.



شکل ۱۱: تصویر هوایی شهرستان لردگان، نرخ فرونشست و پوشش‌های گیاهی آن

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری به وضعیت پدیده فرونشست در شهرستان لردگان و آسیب‌های وارده در اطراف چشمه برم شهر لردگان پرداخته شده است خلاصه مهم‌ترین نتایج آمار بارش‌ها و هیدروگراف‌های مختلف دشت نشان دادند که از سال ۸۶ به بعد میزان بارش‌ها و سطح آب زیرزمینی به نحو قابل توجهی دچار کاهش و افت شدید شده‌اند، به‌عنوان نمونه سطح آب زیرزمینی از عمق حدود ۱۵ متر از سطح زمین به عمق حدود ۳۳ متر افت داشته است، البته این افت آب در برخی نقاط دیگر همچون هیدروگراف دشت جمال به مراتب بیشتر و شدیدتر بوده است. نتایج تکنیک تداخل سنجی راداری برای تصویر کردن محدوده فرونشست، بررسی تغییرات زمانی نشان داد میزان کل بیشینه فرونشست بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ حدود ۱۸ سانتی‌متر بوده است که این میزان فرونشست سالانه حدود ۳ سانتی‌متر می‌باشد. در ادامه بر اساس شواهد و بررسی‌های انجام شده در مورد چشمه برم شهر لردگان مشخص گردید که حجم آب ورودی و خروجی چشمه به نحو چشمگیری دچار کاهش شدید شده است و خشک‌سالی و فرونشست زمین نیز تأثیرات خود را روی این چشمه باستانی داشته است و نکته قابل توجه اینکه احداث سازه‌های سنگین و ساخت‌وسازهای نزدیک چشمه نیز برافت آب و کاهش دبی این چشمه تأثیرگذار بوده است. همچنانکه در سال‌های اخیر آسیب‌های متعددی در سطح شهر و اطراف چشمه برم پدیدار شده است که به‌عنوان نمونه می‌توان به پدیدار شدن شکاف‌ها و ریزش‌های متعدد و سالانه در کف خیابان‌ها و مسیر قنات‌های قدیمی، شکاف‌ها و خرابی دیواره‌های سنگی اطراف چشمه، آسیب‌های وارده به ساختمان‌ها و سازه‌های اطراف اشاره نمود. مضافاً اینکه شواهد متعددی همچون لوله زایی، کم‌آبی چاه‌ها و از کشت خارج شدن بسیاری از زمین‌های کشاورزی به علت عدم وجود آب و به تناسب رشد بیکاری و نبود منبع درآمد موجب مهاجرت از روستاها به شهرها و تشدید آمار بیکاری و معضلات گسترده در این شهرستان شده است. لذا مادامی که الگوی مصرف و برداشت آب در سطح شهرستان اصلاح نگردد، رخداد حوادث و خسارات غیرقابل جبران دور از انتظار نیست.

منابع

- آتشی، ب.، ۱۳۹۶. مطالعه شواهد و تاثیرات مورفولوژیکی مخاطره فرونشست بر تاسیسات و ساختمانهای مسکونی (مطالعه موردی: منطقه ۱۹ شهر تهران)، پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش هیدروژئومورفولوژی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- افضل، ع.، شریفی کیا، م.، شایان، س.، ۱۳۹۲. ارزیابی آسیب پذیری زیرساخت ها و سکونت ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان، دوفصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی ایران، سال اول شماره اول، صص ۶۱-۷۳.
- آکادمی سنجش از راه دور www.girs.ir
- آهنکوب، م.، آیتی، ف.، باقری، ح.، ۱۴۰۱. مطالعه ویژگی های هیدروژئوشیمیائی آب زیرزمینی آبخوان دشت لردگان، استان چهارمحال و بختیاری، زون زاگرس چین خورده، مطالعات علوم محیط زیست، ۷ (۴)، صفحات ۵۵۳۰-۵۵۴۰.
- حسینی میلانی، م.، ۱۳۷۳. اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی و اثرات آن. مجموعه مقالات کنفرانس ملی منابع آب زیرزمینی، سیرجان، صص ۹۸-۹۱.
- روزبان، ع.، ۱۳۹۵. بررسی فرونشست زمینبا استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری و با بکارگیری تصاویر سنجنده جدید سنتینل، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری _ گرایش سنجش از دور، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری گروه مهندسی نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.
- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور منطقه جنوب (مرکز شیراز)، مهندس طهمورث یوسفی (رئیس سازمان زمین شناسی).
- سوری، س.، لشکری پور، غ.، احمدیان مقدم، ر.، و رضانی، ا.، ۱۳۸۹. بررسی افت سطح آب زیرزمینی و رابطه آن با آثار نشست زمین در دشت لردگان، همایش ملی یافته های نوین در مهندسی عمران، نجف آباد.
- عباس نژاد، ا.، ۱۳۷۷. بررسی شرایط و مسائل زمین شناسی محیط زیست دشت رفسنجان، فشرده مقالات دومین همایش انجمن زمین شناسی ایران.
- میراثی، س.، رهنما، ح.، ۱۳۹۵. تحلیل و ارزیابی پارامترهای موثر بر فرونشست زمین. مهندسی عمران مدرس. ۱۳۹۵؛ ۱۶ (۱): ۴۵-۵۴
- میراثی، س.، رهنما، ح.، ۱۴۰۰. پدیده ی فرونشست در شهر شیراز و نواحی اطراف آن، فصلنامه گزارش سازمان نظام مهندسی ساختمان استان فارس، سال سی ام شماره ۱۰۸ (پیاپی ۱۰۹، بهار و تابستان ۱۴۰۰)
- میراثی، س.، رهنما، ح.، ۱۴۰۲، شناسایی زیرسطحی با امواج لرزه ای، چاپ اول، جهاد دانشگاهی واحد استان چهارمحال و بختیاری
- *Araffa, S.A.S., Atya, M.A., Mohamed, A.M., Gabala, M., Zaher, M.A., Soliman, M.M., Mesbah, H.S., Massoud, U. and Shaaban, H.M., 2014. Subsurface investigation on Quarter 27 of May 15th city, Cairo, Egypt using electrical resistivity tomography and shallow seismic refraction techniques. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 3(2), pp.170-183.*
- *Bates, R.L. and Jackson, J.A., 1980. Glossary of Geology (second edition); Fall Church, Virginia. American Geological Institute, 749 p.*
- *Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. and Zebker, H.A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7), pp.9183-9191.*
- *Gambolati, G., Gatto, P. and Freeze, R. A., 1974. Mathematical simulation of the subsidence of Venice, 2. Results, Water Resour. Res., 10, 563-577.*

- H. Rahnema, S. Mirassi, 2014. Drought and water crisis in Plains of Iran: a case study of Marvdasht and Khanmirza Plains, Fars and Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran, *International Bulletin of Water Resources and Development*, 2(1) 139-154.
- Hu, B., Zhou, j., Wangj, Chen, z., and Dongqi Wang, 2009. Risk assessment of land subsidence at Tianjin coadtal area in China, *Environmental Earth Sviences*. Volume 59, Issue 2, pp269-276.
- Hu, R.L., Yue, Z.Q., Wang, L.C., & Wang, S.J., 2004. "Review on current status and challenging issues of and subsidence in China". *Engineering Geology*, 76:65-77.
- Larson. K.J., Basagaoglu, H., & Marino, M.A. 2001. Prediction of optimal safe ground water yield and land Subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California", using a calibrated numerical simulation Model. *Journal of Hydrology*, 242:79-102.
- M. Amighpey, Z. Mousavi, H. Nankali, S. Arabi, M. Sedighi, S. Hosseini, 2008. Studying subsidence in Iran with leveling and permanent GPS observations, in: *Geophysical Research Abstracts*.
- Mirassi S., 2012. M. Sc. Thesis, evaluation of land subsidence phenomenon considering effecting factor and its effect on rural building in Fars plains, Shiraz University of Technology.
- Phien-wej, N., Giao, P.H., & Nutalaya, P., 2006. Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering, Geology*, 82,187-201
- Poland, J.F., 1981. "The occurrence and control of land subsidence due to groundwater withdrawal with special reference to the San Joaquin and Santa Clara Valleys, California", Ph.D Dissertation, Stanford University, Palo Alto, California.
- R. Salehi, M. Ghafoori, G.R. Lashkaripour, M. Dehghani, 2013. Evaluation of land subsidence in southern Mahyar Plain using radar interferometry, *Irrigation and Water Engineering*, 3(3) 47-57.
- Rahnema H. and Mirassi S., 2016. "Study of Land Subsidence Around the City of Shiraz," *Scientia Iranica, Transaction A, Civil Engineering*, 23(3): 882.
- Rahnema, H. and Mirassi, S., 2014. Crisis management concerning underground water falling and land subsidence occurrence in the plains of Iran. *Advances in Environmental Biology*, pp.1453-1466.
- Rahnema, H. and Mirassi, S., 2016. Studying Land Subsidence around the City of Shiraz. *Scientia Iranica*, 23(3), pp.882-895.
- Raucoules, D., Maisons, C., Carnec, C., Le Mouelic, S., King, C. and Hosford, S., 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France): Comparison with ground-based measurement. *Remote sensing of environment*, 88(4), pp.468-478.
- USGS, 2000, 29 Mass Movement and Subsidence Caused by Anthropogenic Activity, Land Subsidence in the United States, Fact Sheet 08700 in Website: <http://clic.cses.vt.edu>, December 20, 2005.