



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مؤسسه تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

## برآورد فرونشست دشت سلماس با استفاده از دستورالعمل تداخل سنجی تفاضلی راداری با دریچه‌ی مصنوعی

احمد نجفی ایگدیر<sup>۱\*</sup>، بهرام چوبین<sup>۲</sup>، کورش شیرانی<sup>۳</sup>

۱ و ۲ - استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران  
۳ - دانشیار پژوهشی پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

### چکیده‌ی مبسوط

#### مقدمه و هدف

در سال‌های اخیر مشکلات ناشی از دخالت‌های بشری در دشت سلماس شامل افزایش استفاده‌ی غیرمنطقی از منابع آب‌های سطحی، افزایش روند تخلیه‌ی آب زیرزمینی و تغییر کاربری زمین موجب فشار بر منابع آب زیرزمینی منطقه شده است که فرونشست زمین حداقل واکنش طبیعی در مقابل کاهش تراز آب‌های زیرزمینی است. از این رو، مطالعه و شناسایی مناطق فرونشست در دشت سلماس ضروری است.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از اطلاعات آب زیرزمینی و تصویرهای راداری سنتینل یک استفاده شد. اطلاعات آب زیرزمینی شامل سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی دریافت شد. در این پژوهش، با روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با دریچه‌ی مصنوعی جابجایی سطح زمین اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از روش‌های تداخل تکرار گذر، اختلاف فاز نشانک‌های SAR تعیین شد. در نهایت با بهره‌گیری از دستورالعمل تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با دریچه‌ی مصنوعی و ۵۲ عدد زوج تصویر سنتینل یک، فرونشست در دشت سلماس در طی سال‌های آبی ۹۴-۱۳۹۳ تا ۹۸-۱۳۹۷ تعیین شد. اعتبارسنجی روش تداخل‌سنجی راداری با استفاده از داده‌های ایستگاه زمین‌پویای (ژئودینامیک) قره‌قشلاق و همچنین تغییرات سطح ایستابی، افت آب زیرزمینی و بازدیدهای میدانی انجام شد.

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: najafieigdir@itc.nl

**استناد:** نجفی ایگدیر، ا.، چوبین، ب.، شیرانی، ک. ۱۴۰۳. برآورد فرونشست دشت سلماس با استفاده از دستورالعمل تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با دریچه‌ی مصنوعی. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷(۱): ۹۸-۱۱۳.

**شناسه‌ی دیجیتال:** 10.22092/WMRJ.2023.361200.1521

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۱/۱۰/۲۶، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۱/۱۱/۱۷، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۱/۱۲/۲۸، **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۳/۰۱/۰۱  
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره‌ی ۳۷، شماره‌ی ۱، شماره‌ی پیاپی ۱۴۲، بهار ۱۴۰۳، صفحه‌های ۹۸ تا ۱۱۳.

©نویسندگان

**ناشر:** مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



## نتایج و بحث

نتایج بررسی فرونشست با روش دریچه‌ی مصنوعی نشان داد که در منطقه میانگین سرعت جابجایی ناشی از فرونشست ۵ سانتی‌متر بود. بررسی تغییر آب‌های زیرزمینی نیز بیان‌گر روند کاهش‌ی اکثر چاه‌های مشاهده‌ای بود. بیشترین اندازه‌ی افت آب زیرزمینی در چاه‌های مناطق شرقی و جنوب‌شرقی (مانند کنگرلو، قره‌قشلاق، یوشانلو و ...) بود. در دوره‌ی بررسی (۱۳۹۷-۱۳۹۳) دلیل افزایش سطح آب در چاه‌های نزدیک به آبگیر سد زولا و گستردگی کانال‌های آبرسانی بود. بیشترین کاهش سطح آب به‌ترتیب در چاه‌های قزلجه، شرق قره‌قشلاق و میدان‌دواب مشاهده شد. چون که این چاه‌ها از آب سد بهره کافی نمی‌برند و از آن دور بودند. بیشترین افزایش نیز به‌ترتیب در چاه‌های مهلم، غرب تازه شهر و ایان در قسمت غربی دشت و نزدیک به دریاچه‌ی سد مشاهده شد. بررسی نقشه‌های فرونشست نشان داد که بیشترین فرونشست در مناطق جنوبی به‌ویژه جنوب‌شرقی دشت سلماس بود که در مقایسه با بخش‌های دیگر دشت ژرفای آبرفت نیز در این مناطق بیشتر بود. این روند فرونشست در سال‌های آبی ۹۴-۱۳۹۳ تا ۹۸-۱۳۹۷ ادامه داشته و در نقشه‌ی نهایی نیز این روند حاکم است.

در دوره‌ی مزبور میانگین تغییرات سطح ایستابی در آبخوان دشت سلماس روند نزولی داشت که این روند با فرونشست زمین هماهنگی داشت. با بررسی نقشه‌ی افت آب‌های زیرزمینی، مشخص شد که مناطق با افت بیشتر روی مناطق فرونشست منطبق بود. افت بیشتر آب‌های زیرزمینی بیان‌گر برداشت آب بیشتر بود. از این رو تخلیه‌ی آب‌های زیرزمینی منطقه سبب فرونشست شده است.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

شناسایی محل دقیق فرونشست زمین در هر منطقه به‌ویژه در مناطق مسکونی، مهمترین وظیفه، قبل از هرگونه برنامه‌ی عملیاتی و سیاست‌گذاری برای اجرا است. در تمام مراحل تصویرهای راداری سنتینل ۱ به اندازه‌ی کافی قادر به حل این مشکل هستند. با این حال، بازدید زمانی طولانی‌تر برای اجرای هرگونه تصمیم‌مفیدتر خواهد بود. فرونشست زمین در دشت سلماس با تغییر سطح آب‌های زیرزمینی و بازدیدهای میدانی، کاملاً تأیید می‌شود. با توجه به رویکرد DInSAR، میانگین نرخ جابجایی ناشی از فرونشست در منطقه ۵ سانتی‌متر بود که از نظر مشاهده‌ی تغییر سطح آب زیرزمینی کاملاً قابل تأیید بود. داده‌های مشاهده‌ای نشان‌دهنده‌ی کاهش سطح ایستابی در اکثر چاه‌ها در مقایسه با گذشته بود و برداشت بیش از اندازه از آب‌های زیرزمینی را تأیید کرد. همچنین با بازدیدهای میدانی مناطق مختلفی از دشت سلماس که فرونشست داشتند، ثبت شد. روند فرونشست در منطقه‌ی مطالعه‌شده ادامه‌دار است و برای کاهش خسارت‌های ناشی از این پدیده و تعدیل آسیب‌های احتمالی به توجه و رسیدگی مسئولان مربوطه نیاز است. بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود مردم را از تبعات برداشت بی‌رویه آگاه کرد و جایگزینی کشت‌های با نیاز آبی سالانه‌ی کم و زودبازده به آنها توصیه شود.

واژگان کلیدی: افت آب زیرزمینی، دشت سلماس، رادار، سنتینل یک، فرونشست

## مقدمه

زیرساخت‌ها، طغیان زمین و کاهش ظرفیت سفره‌های زیرزمینی برای نگهداشت آب، گسیختگی سطح زمین و افزایش احتمال سیل می‌شود. در نهایت برای جامعه و اقتصاد ایجاد خطر می‌کند (هولزر و همکاران ۲۰۰۵). فرونشست زمین با روش‌های گوناگونی اندازه‌گیری می‌شود. این روش‌ها شامل اندازه‌گیری مستقیم تراکم آبخوان با کشتش‌سنج (استروزی و همکاران ۲۰۰۱)، بازدید از تراز آب‌های زیرزمینی، انجام محاسبه‌ها با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و آب‌زمین‌شناسی (هیدروژئولوژی)، اندازه‌گیری پستی‌بلندی، اندازه‌گیری تغییر بلندی با روش‌های زمین‌سنجی (ژئودزی) تسطیح و سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی (GPS) (عابدین و

در یک نگاه کوتاه، واژه‌ی فرونشست، فرورفتن یا سقوط تدریجی یک سطح مادی یا فیزیکی همراه با حرکت افقی ناچیز است. فرونشست زمین را می‌توان به‌عنوان یک پدیده‌ی محیطی یا زمین‌شناسی دانست که باعث کاهش آهسته‌ی بلندی سطح زمین می‌شود (هو و همکاران ۲۰۰۹). این پدیده در اثر فشرده‌شدن طبیعی رسوب‌های تثبیت‌نشده‌ی موجود و استخراج بیش از اندازه‌ی آب‌های زیرزمینی، مایعات زمین گرمایی، نفت، گاز، زغال سنگ و دیگر جامدها از معدن می‌باشد (استروزی و همکاران ۲۰۰۱، چاترچی و همکاران ۲۰۱۵). فرونشست زمین در مقیاس کوچک شیب پستی‌بلندی‌ها را تغییر می‌دهد و باعث آسیب به

کشاورزی با چاه‌های آب قابل برداشت، گزارش کردند. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱) فرونشست زمین در دشت ماهیدشت را با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری بررسی کردند. آنها گزارش کردند که در بازه‌ی زمانی ۹۹-۱۳۹۵ اندازه‌ی فرونشست زمین ۱۵ سانتی‌متر بود و روند آن به سمت مناطق غربی دشت کاهشی بود. آنها دلیل این فرونشست را افت آب‌های زیرزمینی در بازه‌ی زمانی مزبور دانستند، زیرا اندازه‌ی افت در سال‌های پژوهش به ۲/۲۸ متر رسیده است که موجب فرونشست زمین شده است.

در نهایت می‌توان گفت که روش تداخل‌سنجی با استفاده از تصویرهای راداری ابزاری کارآمد برای بررسی پیوسته‌ی فرونشست زمین در گستره‌ی دشت‌ها است. در دشت سلماس با توجه به افت آب‌های زیرزمینی و بروز شواهد فرونشست ناشی از استفاده‌ی غیرمنطقی از منابع آب‌های زیرزمینی برای مصارف آشامیدنی و کشاورزی، شناسایی مناطق فرونشست، ضروری است. بنابراین، این پژوهش با هدف برآورد اندازه‌ی جابجایی در محدوده‌ی دشت سلماس با استفاده از دستورالعمل تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با درجه‌ی مصنوعی در یک دوره‌ی پنج ساله انجام شد. از این رو شناسایی مناطق فرونشست می‌تواند ابزاری مناسب برای کاهش خسارت ناشی از این پدیده باشد و برای تعدیل آسیب‌های احتمالی در اختیار مدیران بخش‌های گوناگون قرار گیرد.

### مواد و روش‌ها

#### موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مطالعه‌شده

منطقه‌ی مطالعه‌شده با مختصات  $38^{\circ}23'$  تا  $38^{\circ}5'$  شمالی و  $44^{\circ}40'$  تا  $45^{\circ}6'$  شرقی در استان آذربایجان غربی و در فاصله‌ی ۹۰ کیلومتری از مرکز استان (ارومیه) و در قسمت شمالی آن است. این منطقه از سنگ‌های دوران‌های مختلف زمین‌شناسی (پراکامبرین تا کواترنری) تشکیل شده است. مناطق جنوبی، غربی و حاشیه‌ی شمالی این منطقه از سنگ‌های رسوبی پوشیده شده است که شامل سنگ‌های آهکی پرمین (تشکیلات روته) در جنوب و جنوب‌غرب، سنگ‌های آهکی، شیل و کنگلومرا مربوط به دوره‌ی کرتاسه در جنوب‌غرب و رسوب‌های آمیزه رنگین (کالردملانژ) در جنوب و شمال‌غرب و رخساره‌ی مارنی (معادل تشکیلات قم) در ناحیه‌ی غربی، شمالی و شمال‌شرق دشت سلماس است (زارعی و همکاران ۲۰۲۰). مساحت دشت سلماس

همکاران (۲۰۰۴) است. باید توجه داشت که تمام این روش‌ها زمان‌بر هستند و اکثر این اندازه‌گیری‌های میدانی به‌ویژه در مناطق متراکم شهری امکان‌پذیر نیستند. این در شرایطی است که پژوهشگران می‌توانند با داده‌های ماهواره‌ای یک منطقه‌ی بزرگ را با دقت رضایت‌بخش بررسی کنند. بنابراین، برای رفع این محدودیت‌ها، می‌توان برای ارزیابی تغییر بلندی سطح زمین از روش‌های دقیق تداخل‌سنجی همراه با تصویرهای گروه زمانی SAR استفاده کرد.

در بسیاری از پژوهش‌ها برای نظارت بر فرونشست زمین ناشی از برداشت بیش از اندازه‌ی آب زیرزمینی از سامانه‌های آبخوان به‌شکل محدود از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با درجه‌ی مصنوعی<sup>۱</sup> استفاده شده است (گوپتا و همکاران ۲۰۱۹). در این پژوهش‌ها، هنگام ارزیابی فرونشست نهفته با زوج تصویر درجه‌ی مصنوعی تصحیحات جوی انجام‌نشده است. تصحیحات جوی برای حذف تأثیر اندازه‌ی بخار آب در جو است، زیرا وجود بخار آب مانع از انتشار نشانک<sup>۲</sup> مایکروویو از آنتن SAR به سوی اجسام هدف شده و آن را به تأخیر می‌اندازد. در مقیاس بزرگ اثر قوی جو ممکن است بر دقت تداخل نگار<sup>۳</sup> تأثیر بگذارد و موجب خطا تا حدود ۳ سانتی‌متر شود (استروزی و همکاران ۱۹۹۹). با این روش در واقع دامنه‌ی ارزیابی سریع فرونشست زمین در یک منطقه‌ی بزرگ فراهم می‌شود. رخداد فرونشست زمین در بسیاری از نقاط جهان از جمله توکیو در ژاپن، شهر مکزیکو در مکزیک، غرب عربستان سعودی، جاکارتا در اندونزی، راونو در ایتالیا، بانکوک در تایلند، دشت پینگ تونگ در تایوان، پکن در چین و غیره مطالعه شده است (گوپتا و همکاران ۲۰۱۹). خطر فرونشست زمین در این مناطق با شدت‌های متفاوتی رخ داده است. نتایج پژوهش کیم و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که به‌دلیل بهره‌برداری بیش از اندازه از آب‌های زیرزمینی، بخش شمال‌غربی دشت هند و گنگ به‌ویژه پنجاب، هاریانا و چندین‌گر در منطقه‌ی پرخطر فرونشست زمین هستند (کیم و همکاران ۲۰۱۸). در دشت قم حاجب و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری اندازه‌ی فرونشست زمین و برداشت آب‌های زیرزمینی منطقه را بررسی کردند و ارتباط میان آنها را نیز تأیید کردند. احمدی و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری فرونشست دشت خرم‌دره را بررسی کردند. این پژوهشگران بیشترین اندازه‌ی فرونشست را در مناطق

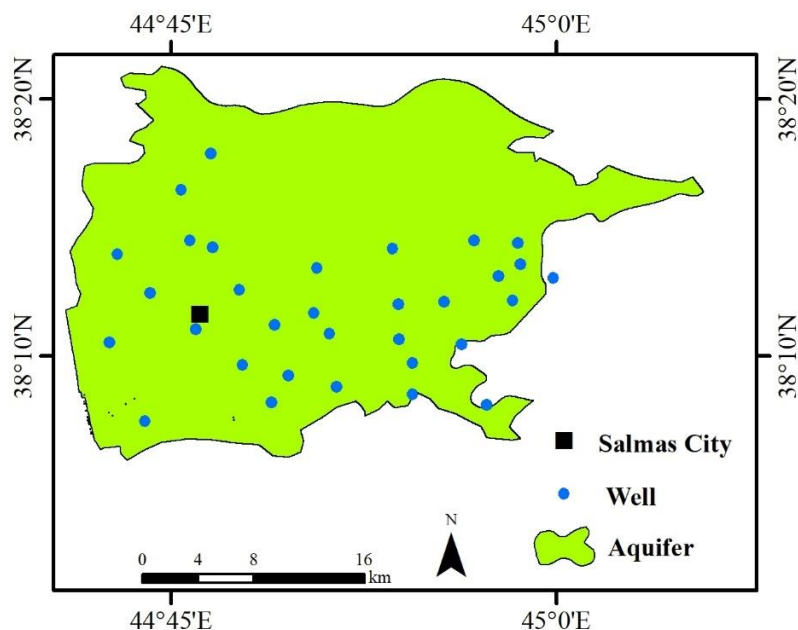
1 - DInSAR

2 - Signal

3 - Interferogram

را پوشش می‌دهند (زارعی و همکاران ۲۰۲۰). در این دشت بر اساس آمار بلندمدت (۹۸-۱۳۶۵) ایستگاه‌های هواشناسی منطقه، کمینه و بیشینه‌ی دما به ترتیب  $14^{\circ}\text{C}$  و  $36^{\circ}\text{C}$  است. میانگین بارندگی سالانه ۲۶۱ میلی‌متر است (زارعی و همکاران ۲۰۲۰). موقعیت دشت سلماس در استان آذربایجان غربی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۶۱۰ کیلومتر مربع است که از انتهای کوه‌های مرزی با ترکیه شروع و تا ساحل دریاچه‌ی ارومیه گسترش یافته است. رود زولا مهمترین زهکش منطقه است و از کوه‌های مرزی سرچشمه‌گرفته است و بعد از سیراب کردن دشت به دریاچه‌ی ارومیه منتهی می‌شود. در این دشت ۳۵ حلقه چاه مشاهده‌ای با میانگین ژرفای ۴۵ متر وجود دارد که ۶۸٪ از سفره‌های آب‌زیرزمینی دشت



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی مطالعه‌شده.

Figure 1- Location of the study area.

سنسینل یک (A و B) در سال‌های آبی ۹۴-۱۳۹۳ تا ۹۸-۱۳۹۷ از درگاه Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) تهیه شد. تاریخ زوج تصویرهای راداری استفاده‌شده در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین مشخصات تصویرهای راداری سنسینل یک در جدول ۲ نشان داده شده است.

#### داده‌های استفاده‌شده

داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش شامل اطلاعات آب‌زیرزمینی و تصویرهای راداری سنسینل یک است. اطلاعات آب‌زیرزمینی (سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای) از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی جمع‌آوری شد. همچنین، تصویرهای راداری

جدول ۱- تاریخ تصویرهای راداری استفاده‌شده برای برآورد فرونشست.

Table 1- Date of radar images used to subsidence estimation.

Row	Master image	Slave image	Row	Master image	Slave image
1	2014.11.10	2014.12.04	27	2017.07.02	2017.08.07
2	2014.12.04	2015.01.21	28	2017.08.07	2017.09.12
3	2015.01.21	2015.02.14	29	2017.09.12	2017.10.06
4	2015.02.14	2015.03.10	30	2017.10.06	2017.11.11
5	2015.03.10	2015.04.03	31	2017.11.11	2017.12.05
6	2015.04.03	2015.05.21	32	2017.12.05	2018.01.10
7	2015.05.21	2015.06.14	33	2018.01.10	2018.02.03
8	2015.06.14	2015.07.08	34	2018.02.03	2018.03.11
9	2015.07.08	2015.08.01	35	2018.03.11	2018.04.04
10	2015.08.01	2015.09.18	36	2018.04.04	2018.05.10
11	2015.09.18	2015.10.12	37	2018.05.10	2018.06.03
12	2015.10.12	2015.11.29	38	2018.06.03	2018.07.09
13	2015.11.29	2015.12.23	39	2018.07.09	2018.08.02
14	2015.12.23	2016.02.09	40	2018.08.02	2018.09.07
15	2016.02.09	2016.03.04	41	2018.09.07	2018.10.25
16	2016.03.04	2016.04.21	42	2018.10.25	2018.11.06
17	2016.04.21	2016.08.24	43	2018.11.06	2018.12.12
18	2016.08.24	2016.11.16	44	2018.12.12	2019.01.05
19	2016.11.16	2016.12.10	45	2019.01.05	2019.02.10
20	2016.12.10	2017.01.03	46	2019.02.10	2019.03.06
21	2017.01.03	2017.02.08	47	2019.03.06	2019.04.11
22	2017.02.08	2017.03.04	48	2019.04.11	2019.06.22
23	2017.03.04	2017.04.09	49	2019.06.22	2019.07.04
24	2017.04.09	2017.05.27	50	2019.07.04	2019.08.09
25	2017.05.27	2017.06.08	51	2019.08.09	2019.09.14
26	2017.06.08	2017.07.02	52	2019.09.14	2019.10.08

جدول ۲- مشخصات تصویرهای راداری سنتینل یک استفاده‌شده در پژوهش.

Table 2- Characteristics of Sentinel-1 radar images used in this research.

Product Type	Sensor Mode	Polarization	Orbit	Spatial resolution
Single Look complex (SLC)	Interferometry wide swath (IW)	VV: Single co-polarization, vertical transmit/vertical receive	Descending	10×10 m

### انتخاب زوج تصویرهای راداری

تداخل‌سنجی تفاضلی، اختلاف فاز دو تصویر از یک منطقه در دو زمان مختلف است که برای برآورد اختلاف جابجایی سطح زمین استفاده می‌شود. در این روش نام تصویر اول پایه<sup>۴</sup> و نام تصویر دوم تابع<sup>۵</sup> است. برای بررسی فرونشست زمین منطقه‌ی پژوهش از ۵۲ زوج تصویر سنتینل یک در سال‌های آبی ۹۴-۱۳۹۳ تا ۹۸-

### روش تداخل‌سنجی راداری

در این پژوهش، با روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری با دریچه‌ی مصنوعی (DInSAR) جابجایی سطح زمین اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از روش‌های تداخل تکرار گذر، اختلاف فاز نشانک‌های SAR تعیین شد. مراحل روش به شرح زیر بود:

4 - Master

5 - Slave

استفاده شد.

### فیلتر گلدشتاین<sup>۶</sup>

با استفاده از فیلتر گلدشتاین مؤلفه‌ی پستی‌بلندی از تداخل‌نگار حذف شد و خطای فاز (ناشی از نشانک رادار) نیز از بین رفت که سبب بهبود کیفیت تصویر خروجی شد. انجام این مرحله برای تولید تصویرهای همدوسی نیز مفید بود. دامنه‌ی همدوسی بین ۰ تا ۱ بود و همدوسی زیاد کیفیت بهتری از تداخل‌نگار ایجاد کرد.

### بازیابی فاز<sup>۷</sup> (Unwrapping)

بازیابی فاز، فرآیندی است که اندازه‌ی فاز مطلق از اندازه‌ی اصلی فاز با بیش‌ترین دقت بازیابی می‌شود. برای بازیابی فاز و تبدیل فاز به جابجایی در محیط نرم‌افزار SNAP از افزونه SNAPHU و تداخل‌نگارهای ایجادشده، استفاده شد.

### برآورد جابجایی

در نهایت بازیابی فاز به جابجایی در راستای خط دید ماهواره تبدیل شد و اندازه‌ی جابجایی مشخص شد.

### اعتبارسنجی

پس از تهیه‌ی نقشه‌ی فرونشست با روش درپچه‌ی مصنوعی، اعتبارسنجی روش تداخل‌سنجی راداری با استفاده از داده‌های ایستگاه زمین پویای قره‌قشلاق، داده‌های تغییر سطح ایستایی و افت آب زیرزمینی و بازدیدهای میدانی انجام شد. ایستگاه قره‌قشلاق در دشت سلماس است و تغییرهای جابجایی افقی و عمودی را ثبت می‌کند. داده‌های آن از پایگاه شبکه‌ی ایستگاه‌های دائمی زمین‌پویا و GNSS ایران (<https://ipgn.ncc.gov.ir/pggn>) جمع‌آوری شد. همچنین برای دوره‌ی زمانی بررسی‌شده از اداره‌ی آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی داده‌های سطح آب‌های زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای نیز جمع‌آوری شد (شکل ۱).

روش تداخل‌سنجی راداری و مراحل پژوهش در شکل ۲ نشان‌دهنده شده است. برای برآورد فرونشست تمام مراحل پردازش تصویرهای راداری با نرم‌افزار SNAP نسخه‌ی ۸ انجام شد.

۱۳۹۷ استفاده شد. برای بررسی فرونشست ابتدا زوج تصویرهای راداری در بازه‌های زمانی یک ساله، شش ماهه و سه ماهه انتخاب شد. در این پژوهش در فاصله‌های زمانی مزبور اندازه‌ی همدوسی میان زوج تصویرها کم بود و از آنجایی که کاهش اندازه‌ی همدوسی بر نتایج به‌دست آمده از تصویرها بسیار تاثیرگذار است، برای حفظ همدوسی فاصله‌ی میان زوج تصویرها عمدتاً یک ماه در نظر گرفته شد. از سوی دیگر برای خط مبنای مکانی از داده‌هایی استفاده شد که اندازه‌ی خط مبنای مکانی آنها به صفر نزدیک بود. از این‌رو تصویرهای راداری تقریباً در هر ماه از سال‌های ۹۴-۱۳۹۳ تا ۹۸-۱۳۹۷ انتخاب شدند. با در نظر گرفتن بازه‌ی زمانی کوتاه‌تر اندازه‌های همدوسی میان تصویرها افزایش یافت. بر این اساس برای شناسایی فرونشست در بازه‌ی پنج ساله تعداد ۵۲ زوج تصویر راداری (هر یک با میانگین همدوسی بیشتر از ۰/۵) استفاده شد (جدول ۱).

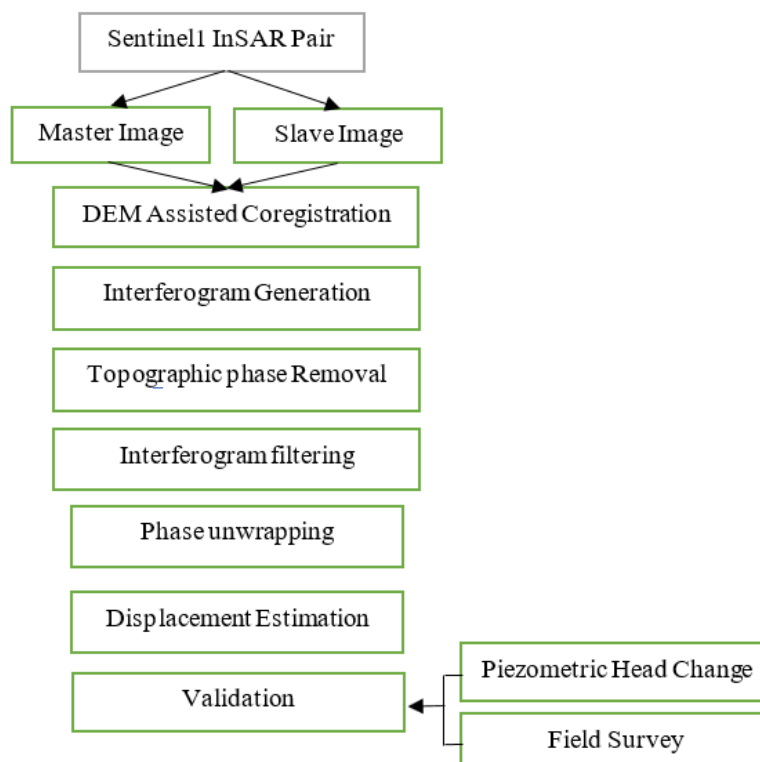
### تطابق هندسی

بعد از تعریف اطلاعات مداری تصویرهای راداری، خطای هندسی که مربوط به اختلاف موقعیت آنتن سنجنده در هنگام تصویربرداری است، حذف شد.

### ایجاد تداخل‌نگار

تداخل‌نگار از روی هم قرار دادن دو تصویر SAR با اندازه‌های فازی متفاوت در هر پیکسل ایجاد می‌شود. تداخل‌نگار بیان‌گر تغییرات و جابجایی سطح زمین است که نتیجه‌ی اختلاف فاز دو تصویر راداری است. در یک تداخل‌نگار منطقی، اختلاف فاز ناشی از موارد گوناگونی، مانند (الف) اختلاف فاز ناشی از خط مبنای فضایی داده‌ها (زوج شده) با فرض صاف بودن سطح زمین، (ب) اختلاف فاز ناشی از ناهمواری پستی‌بلندی، (ج) اختلاف فاز ناشی از جابجایی زمین در جهت برد (خط دید رادار)، (د) اختلاف فاز ناشی از خطای تغییر فاز جوی، (ه) اختلاف فاز ناشی از اثر نویز باقی‌مانده از ویژگی‌های پخش اجسام هدف که تابعی از زمان و نویز حرارتی است (کیم و همکاران ۲۰۰۷). با تولید تداخل‌نگار، فقط خطای زمین‌سنجی حذف می‌شود و در مراحل بعدی باید خطای پستی‌بلندی نیز از روی آن حذف شود و فیلترهای مناسب اعمال شود. در این پژوهش برای حذف اثر پستی‌بلندی از روی تداخل‌نگار تولیدشده از SRTM 1 Sec HGT





شکل ۲- نمودار مراحل انجام پژوهش.  
Figure 2- Diagram of research steps .

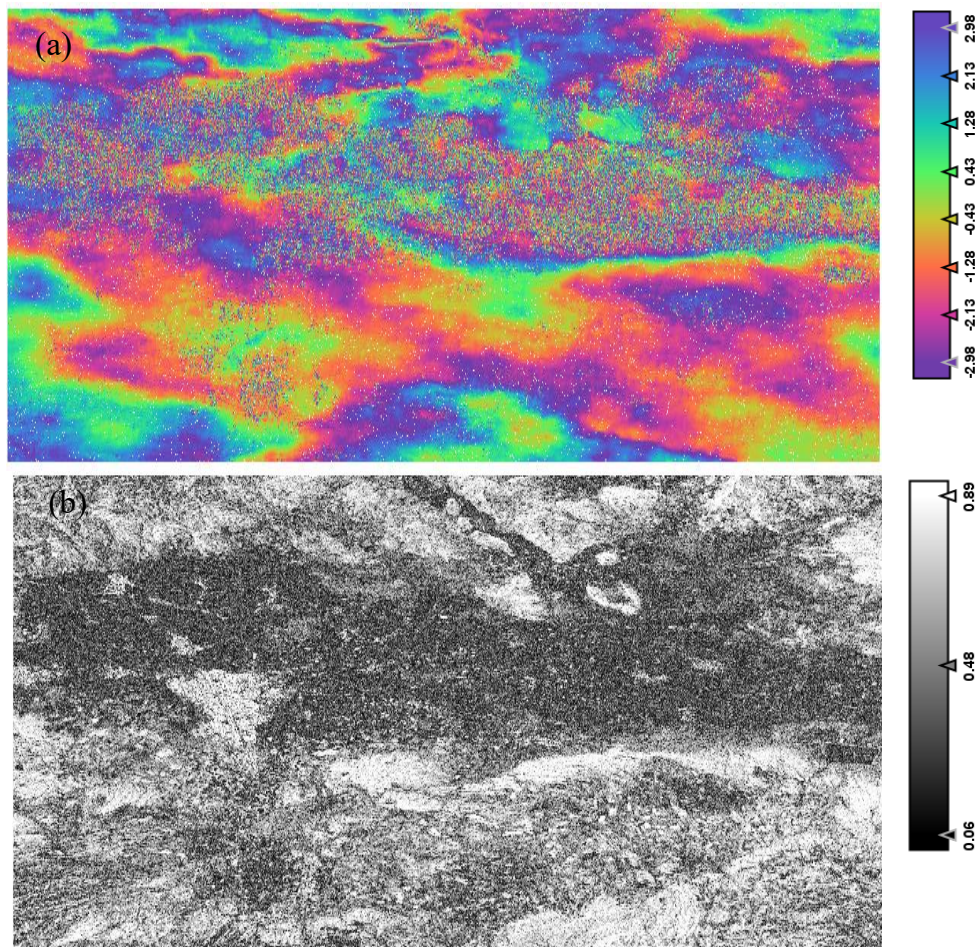
## نتایج و بحث

### برآورد فرونشست با تصویرهای راداری

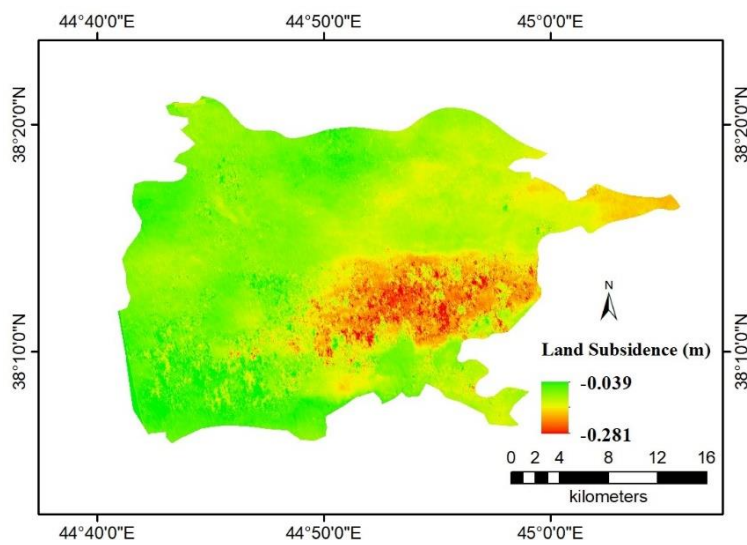
در این پژوهش بررسی فرونشست زمین دشت سلماس با روش دریچه‌ی مصنوعی و ۵۲ زوج تصویر سنتینل یک (A) در سال‌های آبی ۱۳۹۳-۹۴ تا ۱۳۹۷-۹۸ انجام شد. نمونه‌ای از تداخل‌نگارهای تشکیل شده در منطقه‌ی پژوهش و هم‌دوسی میان زوج تصویرها در شکل ۳ نشان داده شده است. با گردآوری نتایج به‌دست آمده از زوج تصویرها و پس از اطمینان از هم‌دوسی مناسب تصویرها، اندازه‌ی فرونشست در هر سال تعیین شد. اندازه‌ی فرونشست به‌دست آمده در هر سال در شکل‌های ۴ تا ۸ نشان داده شده است. فرونشست زمین در دوره‌ی پنج ساله‌ی آبی (۱۳۹۳-۹۴ تا ۱۳۹۷-۹۸) از ۱۵ تا ۷۶ سانتی‌متر متغیر بود که سطوح مرکز متمایل به شرق و

جنوب آبخوان بیشترین اندازه‌ی افت را نشان داد (شکل ۹).

به‌طور کلی، بررسی نقشه‌های فرونشست دشت سلماس نشان داد که بیشترین فرونشست در مناطق جنوبی به‌ویژه جنوب شرقی دشت متمرکز بود، که در مقایسه با قسمت‌های دیگر دشت ژرفای آبرفت نیز بیشتر بود. این روند فرونشست از سال آبی ۱۳۹۳-۹۴ تا ۱۳۹۷-۹۸ ادامه داشته است و در نقشه‌ی نهایی نیز این روند حاکم بود. بیشترین تراکم چاه‌های منطقه نیز در قسمت شرقی و جنوب شرقی دشت است و به‌دلیل دوری از آبگیر سد زولاچای و تراکم کانال‌های منشعب از دریاچه‌ی سد، آب لازم برای کشاورزی از راه آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود که این اتفاق موجب تخلیه‌ی هر چه بیشتر آبخوان شده است.

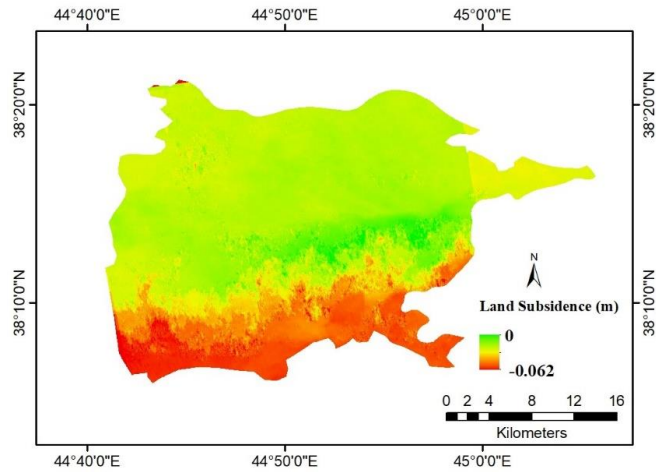


شکل ۳- نمونه‌ای از تداخل‌نگارهای تشکیل‌شده (a) اندازه‌ی هم‌دوسی (b) میان زوج تصاویرهای ۲۰۱۸/۰۸/۰۲ و ۲۰۱۸/۰۹/۰۷.  
 Figure 3- An example of the interferograms (a) the degree of coherence (b) between the pair images on 2018.08.02 and 2018.09.07.

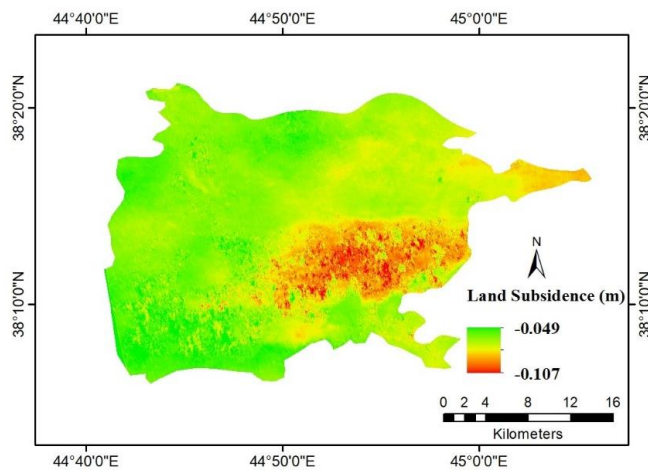


شکل ۴- نقشه‌ی فرونشست دشت سلماس (۹۴-۱۳۹۳).  
 Figure 4- Selmas plain subsidence map (2015).

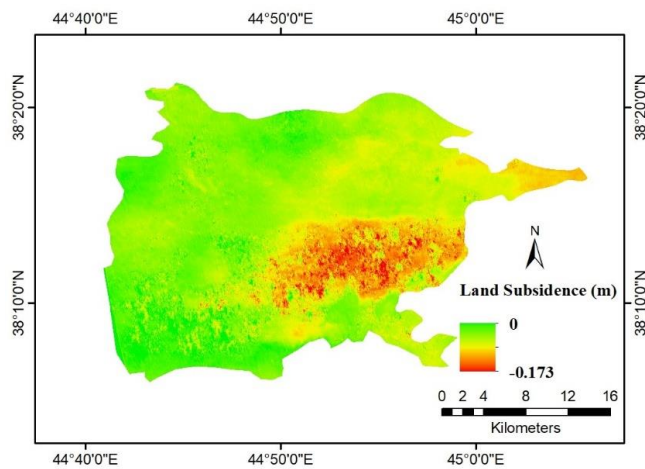




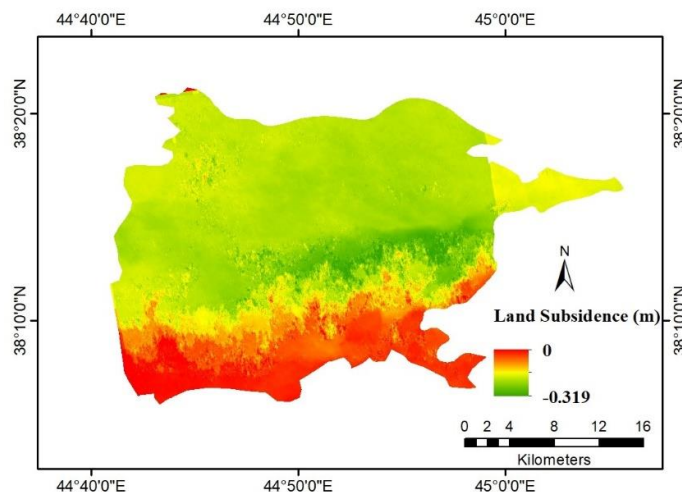
شکل ۵- نقشه‌ی فرونشست دشت سلماس (۹۵-۱۳۹۴).  
Figure 5- Selmas plain subsidence map (2016).



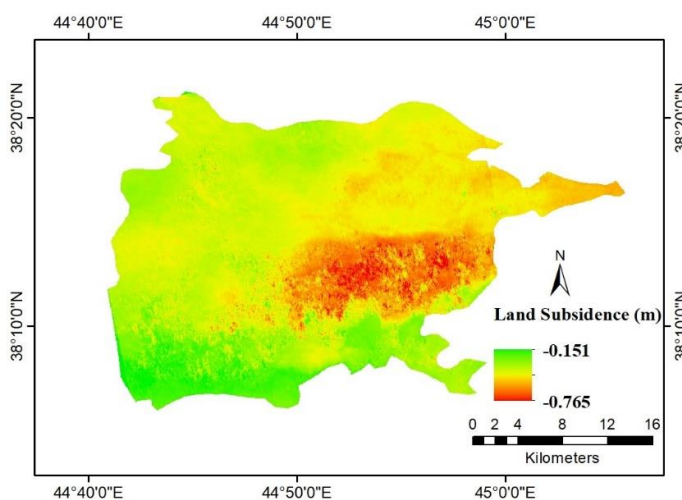
شکل ۶- نقشه‌ی فرونشست دشت سلماس (۹۶-۱۳۹۵).  
Figure 6- Selmas plain subsidence map (2017).



شکل ۷- نقشه‌ی فرونشست دشت سلماس (۹۷-۱۳۹۶).  
Figure 7- Selmas plain subsidence map (2018).



شکل ۸- نقشه‌ی فرونشست دشت سلماس (۹۸-۱۳۹۷).  
Figure 8- Selmas plain subsidence map (2019).



شکل ۹- نقشه‌ی فرونشست دشت سلماس (سال‌های آبی ۹۴-۱۳۹۳ تا ۹۸-۱۳۹۷).  
Figure 9- Subsidence map of Salmas plain (2015 – 2019).

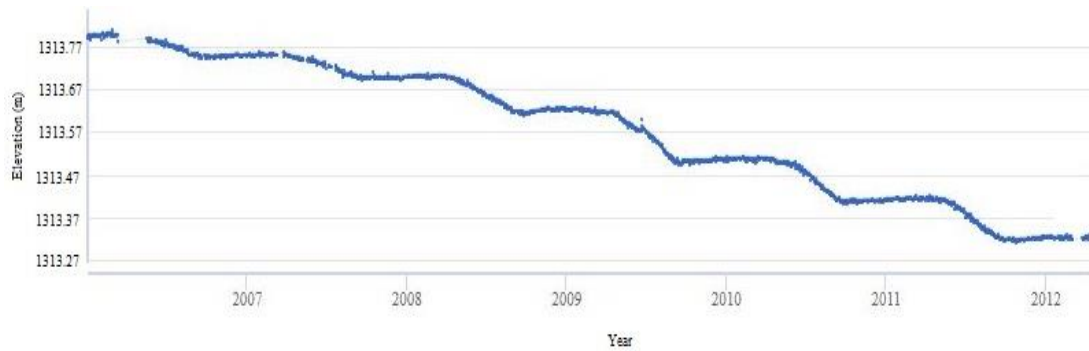
سانتی‌متر در ۶ سال بود (شکل ۱۰). اگر چه ایستگاه بعد از سال ۲۰۱۲ منحل شده است و آمار آن با دوره‌ی زمانی مطالعه‌شده هماهنگ نیست اما به‌خوبی گویای وجود فرونشست و بیان‌گر روند آن در دشت سلماس است. در سال‌های اخیر به‌علت کمبود بارش، فشار بر منابع آب‌های زیرزمینی ادامه‌دار است و روند فرونشست زمین نیز ادامه‌دار است که بررسی‌ی تصویرهای راداری نیز این یافته را تأیید کرد.

#### اعتبارسنجی نتایج فرونشست

نتایج اعتبارسنجی فرونشست برآورد شده به وسیله‌ی رادار به شرح سه روش زیر بود:

#### اعتبارسنجی با استفاده از ایستگاه زمین‌پویا

ایستگاه زمین‌پویای قره‌قشلاق در دشت سلماس از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۲ فعال بود که از سال ۲۰۱۲ ایستگاه منحل شد. بر پایه‌ی آمار ایستگاه، اندازه‌ی فرونشست زمین ۴۸



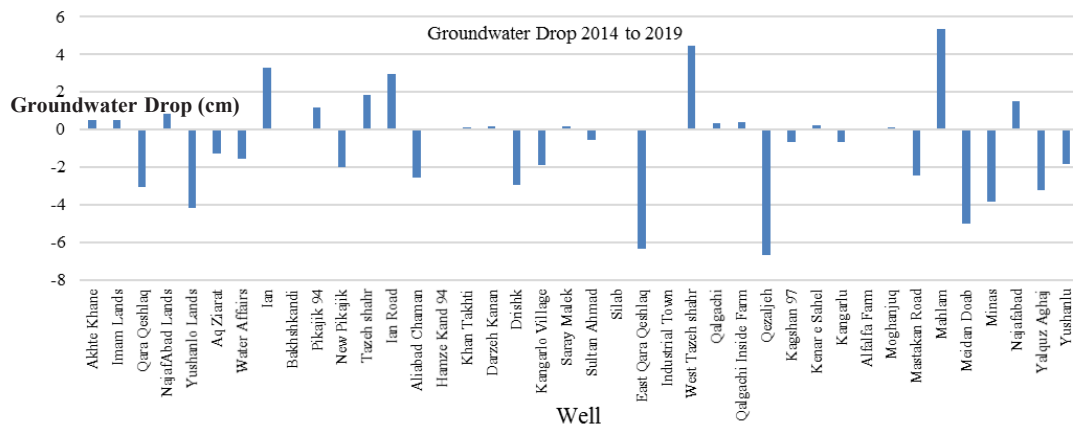
شکل ۱۰- تغییر فرونشست زمین در دشت سلماس بر اساس ایستگاه زمین پویا قره قشلاق.

Figure 10- Land subsidence changes in the Salmas plain based on the Qareqeshlaq geodynamic station.

داشتند. از سویی دیگر چاه های قزلجه، شرق قره قشلاق و میدان دوآب به ترتیب بیشترین کاهش سطح آب را داشتند و از آب سد بهره ی کافی نمی بردند (شکل ۱۱). چاه های نزدیک به دریاچه ی سد مانند مهلم، غرب تازه شهر و ایان در قسمت غربی دشت به ترتیب افزایش مناسبی داشتند. با شروع آبیگری سد زولا، چاه هایی که در منطقه ی غرب دشت سلماس و نزدیک به دریاچه ی سد زولا بودند سطح آب در آنها افزایش یافت (شکل ۱۲). ولی چاه های شرقی دشت به دلیل تغذیه ی ناکافی از منبع آب، سطح آب در آنها کاهش شدیدی داشت (شکل ۱۳).

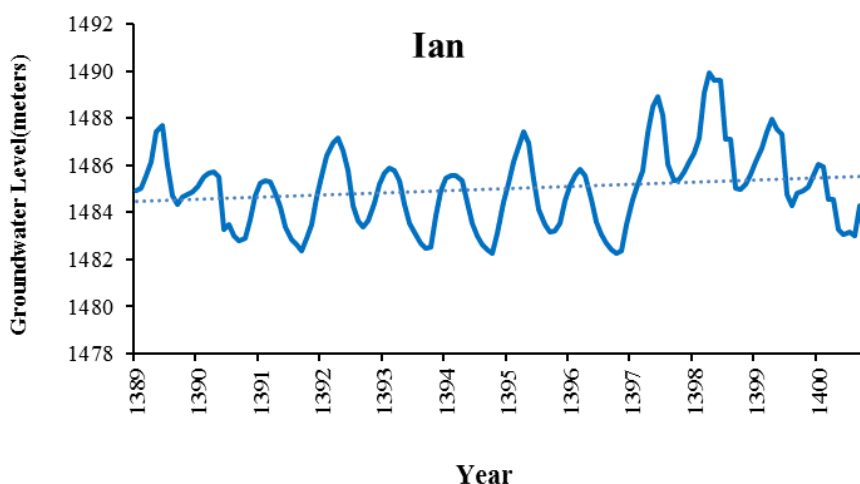
### اعتبارسنجی با استفاده از تغییر سطح ایستابی و افت آب های زیرزمینی

بررسی تغییر آب های زیرزمینی دشت سلماس نشان داد که روند این تغییرها بیشتر کاهش بود و با نتایج به دست آمده از رادار هماهنگ بود. اندازه ی افت آب در مناطق مرکزی، شرقی و جنوب شرقی (مانند کنگرلو، قره قشلاق و یوشانلو) که چاه داشتند، بیشتر بود (شکل ۱۱). به دلیل سال آماری مشترک دوره ی بررسی از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ انتخاب شد. در این دوره ی زمانی چاه هایی به علت ورود آب سد زولا به آنها، افزایش سطح آب داشتند. همچنین این چاه ها به منبع آبی منطقه (دریاچه ی سد زولا) نزدیک بودند و کانال های آب های سطحی متراکم



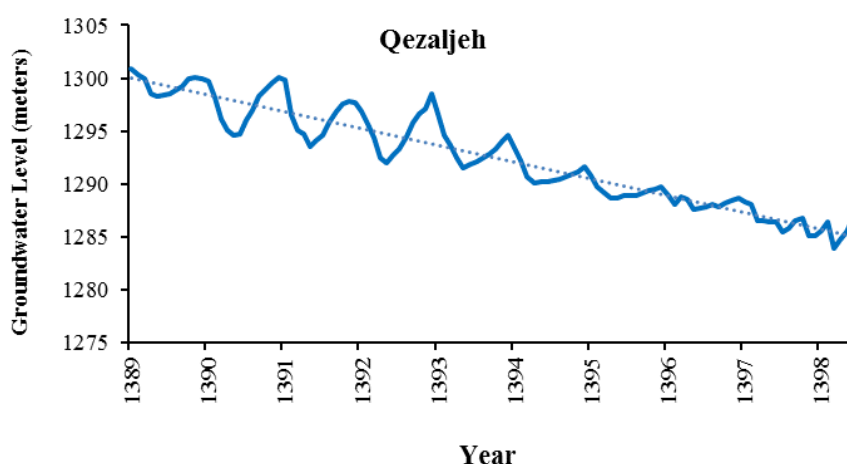
شکل ۱۱- اندازه ی تغییر سطح آب چاه های مشاهده ای منطقه در دوره ی زمانی (۹۷-۱۳۹۳).

Figure 11- Changes in the water level of piezometric wells in the region during (2014 – 2019).



شکل ۱۲- روند افزایشی چاه مشاهده‌ای ایان.

Figure 12- The increasing trend of piezometric well in Ian.

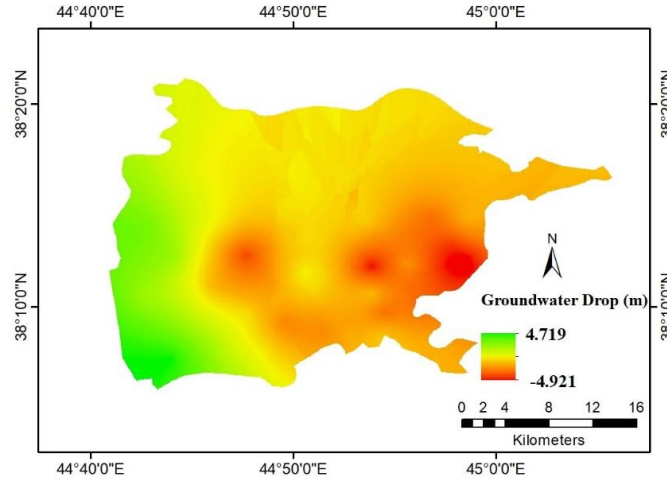


شکل ۱۳ - روند کاهش‌ی چاه مشاهده‌ای قزلجه.

Figure 13- The decreasing trend of piezometric well in Qezaljeh.

هماهنگی کاملی با مناطق فرونشست داشت (شکل ۱۴). افت بیشتر آب‌های زیرزمینی بیان‌گر برداشت آب بیشتر بود. از این‌رو تخلیه‌ی آب‌های زیرزمینی منطقه سبب فرونشست شده است.

به‌طور کلی تغییر سطح ایستابی در آبخوان دشت سلماس در دوره‌ی مزبور روند نزولی داشت که با فرونشست زمین نیز هماهنگ بود. بررسی نقشه‌ی افت آب‌های زیرزمینی نشان داد که مناطق با افت بیشتر



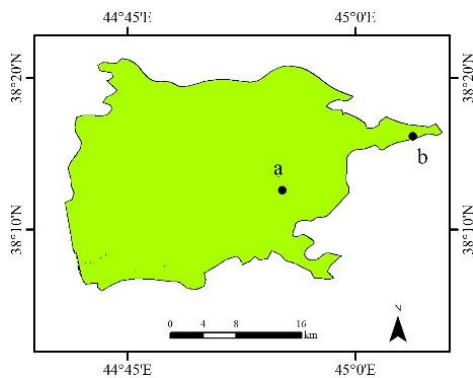
شکل ۱۴- نقشه‌ی اندازه‌ی افت آب‌های زیرزمینی دشت سلماس (سال‌های آبی ۹۴-۱۳۹۳ تا ۹۸-۱۳۹۷).

Figure 14- Groundwater drop in the Salmas Plain from (2015 – 2019).

آن به شکل آشکار در بعضی از مناطق قابل مشاهده است. از مهمترین این مناطق می‌توان منطقه‌ی لکستان را نام برد (شکل ۱۵).

### اعتبارسنجی با بازدیدهای میدانی

با بازدیدهای میدانی از دشت سلماس مشخص شد که منطقه شدیداً تحت تأثیر فرونشست زمین است و شواهد



شکل ۱۵- بازدید میدانی از شواهد فرونشست در عرصه.

Figure 15- Field survey of subsidence in the study area.

سطح ایستایی در بیشتر چاه‌ها در مقایسه با گذشته بود که این یافته نتیجه‌ی برداشت بیش از اندازه از آب‌های زیرزمینی است. با بازدیدهای میدانی از مناطق مختلف دشت سلماس مناطقی که فرونشست داشتند شناسایی شدند. روند فرونشست در منطقه‌ی مطالعه‌شده ادامه‌دار است و برای کاهش خسارت‌های ناشی از این پدیده و تعدیل آسیب‌های احتمالی به توجه و رسیدگی مسئولان مربوطه نیاز است. بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود مردم را از تبعات برداشت بی‌رویه آگاه کرد و جایگزینی کشت‌های با نیاز آبی سالانه‌ی کم و زود بازده به آنها توصیه شود.

### نتیجه‌گیری

شناسایی محل دقیق فرونشست زمین در هر منطقه به‌ویژه در مناطق مسکونی، مهمترین وظیفه، قبل از هرگونه برنامه‌ی عملیاتی و سیاست‌گذاری برای اجرا است. در تمام مراحل تصویرهای راداری سنتینل ۱ به اندازه‌ی کافی قادر به حل این مشکل هستند. با این حال، بازدید زمانی طولانی‌تر برای اجرای هرگونه تصمیم مفیدتر خواهد بود. نتایج بررسی فرونشست با روش دریچه‌ی مصنوعی نشان داد که در منطقه میانگین سرعت جابجایی ناشی از فرونشست ۵ سانتی‌متر بود. از دیدگاه تغییر سطح آب‌های زیرزمینی، این یافته کاملاً قابل تأیید بود. داده‌های مشاهده‌ای نشان‌دهنده‌ی کاهش



فهرست منابع

- Abedini M. Ebady E. Ghale E. 2022. Investigation of subsidence of Mahidasht plain of Kermanshah province using radar interferometry method. *Geography and Planning*. 26(79): 207-220. (In Persian).
- Abidin HZ. Djaja R. Andreas H. Gamal M. Hirose K. Maruyama Y. 2004. Capabilities and constraints of geodetic techniques for monitoring land subsidence in the urban areas of Indonesia. *Geomatics Research Australia*. 81: 45-58
- Ahmadi N. Mousavi Z. Masumi Z. 2018. Khoramdarreh subsidence estimation using SAR interferometry and investigation its risks. *Remote Sensing and GIS*. 10(3): 33-52. (In Persian).
- Chatterjee RS. Thapa S. Singh KB. Varunakumar G. Raju EVR. 2015. Detecting, mapping and monitoring of land subsidence in Jharia Coalfield, Jharkhand, India by spaceborne differential interferometric SAR, GPS and precision levelling techniques. *Journal of Earth System Science*. 124(11): 1359-1376
- Gupta A. Asopa U. Bhattacharjee R. 2019. Land Subsidence Monitoring in Jagadhri city using Sentinel 1 DInSAR Processing. *In Proceedings*. 24(1): 25. Doi:10.3390/IECG2019-06230
- Hajeb Z. Mousavi Z, Masoumi Z, Rezaei A. 2018. Investigation of subsidence of Qom plain using radar interferometry. *Proceedings of the 18th Iran Geophysical Conference*. pp. 352-355. (In Persian).
- Holzer TL, Galloway DL. 2005. Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*. 16: 87-99. Doi: 10.1130/2005.4016(08)
- Hu B. Zhou J. Wang J. Chen Z. Wang D. Xu S. 2009. Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. *Environmental Earth Sciences*. 59: 269-276. DOI: 10.1007/s12665-009-0024-6
- Kim J. Lin SY. Singh S. Singh T. Tsai YL. Gupta S. Save H. 2018. Surface deformations by ground water depletion over N. W. India. local and global scale observations using InSAR and space geodesy and their geological implications. *In EGU General Assembly Conference Abstracts*. 20 :17305.
- Kim J. Kim DJ. Kim SW. Won JS. Moon WM. 2007. Monitoring of urban land surface subsidence using PSInSAR. *Geosciences Journal*. 11(1): 59-73.
- Strozzi T. Wegmuller U. 1999. Land subsidence in Mexico City mapped by ERS differential SAR interferometry. *In Proceedings of the IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No.99CH36293)*. Volume 4:1940-1942.
- Strozzi T. Wegmüller U. Tosi L. Bitelli G. Spreckels V. 2001. Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 67(11): 1261-1270.
- Zarei K. Rasoulzadeh A. Seddighi A. Ahmadzadeh G. Ramezani J. 2020. Determination of the relationship between land subsidence and ground water level loss with radar interferometry and GPS station methods (Case study: Salmas Plain). *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 1(11):168-182. (In Persian). Doi:10.22125/IWE.2020.114960



## Estimation of Land Subsidence in Salmas Plain Using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar Algorithm

Ahmad Najafi Igdirdir<sup>1\*</sup>, Bahram Choubin<sup>2</sup>, Kourosh Shirani<sup>3</sup>

1 and 2- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran  
3- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, AREEO, Tehran, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

In recent years, problems caused by human interference in the Salmas Plain, such as an increase in the irrational use of surface water resources, an increase in the process of groundwater discharge, and a change in land use have caused pressure on the groundwater resources of the region; hence, land subsidence is at least a natural response to the decrease in groundwater level. Therefore, it is important to study and identify subsidence areas in the region.

#### Materials and Methods

In this research, groundwater information and Sentinel 1 radar images were used. Groundwater information was obtained from the regional water company of West Azarbaijan province. In the present research, the DInSAR algorithm was used to measure the ground surface displacement, and the phase difference of the SAR signals was determined using the repeated-pass interference methods. Finally, by using the manual of differential radar interferometry with synthetic aperture and 52 even numbers of Sentinel 1 image, the subsidence in the Salmas Plain was determined between 2014 and 2015 and 2018 and 2019. Validation of the radar interferometry method using Qareqeshlaq Geodynamic station data, as well as groundwater level changes, underground water drop and field observations was conducted.

#### Article Type: Research Article

\*Corresponding Author E-mail: najafieigdir@itc.nl

Citation: Najafi Igdirdir, A., Choubin, B., Shirani, K. 2024. Land subsidence estimation in Salmas plain Using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar Algorithm. Watershed Management Research. 37(1): 98-113.

DOI: 10.22092/WMRJ.2023.361200.1521

Received: 16 January 2023, Received in revised form: 06 February 2023, Accepted: 19 March 2023,

Published online: 20 March 2024

Watershed Management Research, VOL. 37, No.1, Ser. No: 142, Spring 2024, pp. 98-113.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center ©Author(s)



### Results and Discussion

The results of the subsidence study using the DInSAR method showed that the average annual displacement rate is about 5 cm. Investigation of groundwater changes also indicated a decreasing trend in most of the wells. The wells located in the eastern and southeastern regions (e.g., Kangarlu, Qareqeshlaq, Yushanlu, etc.) have the highest amount of groundwater drop. In the study period (2014 to 2019), where the wells with an increase in groundwater level were affected by their proximity to the Zola dam reservoir and the water supply channels. The wells of Qezelgeh, East Qareqeshlaq, and Maidan Doab have the highest water level reductions, but they do not have sufficient water supply from the dam. Mahlam, West Tazeshahr, and Ian wells, which are in the western part of the plain and close to the dam lake, respectively, have a suitable increase. Checking the subsidence maps of the Salmas plain showed that most of the subsidence is concentrated in the southern areas, especially in the southeast of the plain, in comparison to other parts of the plain the depth of alluvium is also greater in these areas. This subsidence trend continued from 2014 to 2019 and this trend is also prevalent in the final map. During this period, the average water level changes in the Salmas plain aquifer had a downward trend, which was in harmony with land subsidence. By reviewing the groundwater drop map, it was found that the areas with the highest drop coincided with the subsidence areas. More drop in underground water indicated more water extraction. Therefore, the discharge of underground water in the region has caused subsidence.

### Conclusion and Suggestions

Before adopting any operational plan and policy for implementation, it is the most important task to identify the exact location of land subsidence in any area, in particular residential areas. Sentinel1 radar images are sufficiently capable of solving this problem at all stages; however, a longer observation time would be more useful for decision making and implementation. Land subsidence in the Salmas plain is fully confirmed by the change of the underground water level and field visits. According to the DInSAR approach, the average displacement rate due to subsidence in the region was 5 cm, which can be fully verified in terms of observations of changes in the groundwater level. The piezometric data show a reduction of in the water level in most wells compared to the past, which depicts the occurrence of excessive extraction of groundwater. In addition, field surveys have been conducted in different areas of the Salmas Plain and the subsidence areas have been recorded. The process of subsidence in the studied area is ongoing, and the attention and care of the relevant authorities is needed to reduce the damage caused by this phenomenon and adjust the possible damages. It is recommended that people should be aware of the consequences of excessive harvesting and recommend alternative crops with a low annual demand for water and early yields.

**Keywords:** Groundwater drop, radar, Salmas plain, Sentinel 1, subsidence