

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب

ارزیابی فرونشست زمین و رفتار متقابل آبخوان با استفاده از تکنیک‌های تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت سملقان)

نگارنده: فاطمه رفیعی

اساتید راهنما

دکتر سعید قره‌چلو

دکتر سعید گلیان

بهمن ۹۹

محل قرارگیری صورت جلسه دفاع

تقدیم اثر

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگی‌ام، چشمان زیبای مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شتم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانی‌تان را پاس توانم بگویم.

امروز، هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید بلخ به‌شتم رضای شما

ره‌آوردی کران‌سنگ ترا از این ارزان‌نداشتم تا به خاک پستان‌نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نیم‌گونه‌خوار محنتی‌تان را

بروید

بوسه بر دستان پر مهرتان

تشکر و قدردانی

نهال را "باران" باید تا سیرابش کند از آب حیات و "آفتاب" باید تا تاباند نیرو و محکم کند شاخه های تازه روئیده

را؛ بسی شایسته است از اساتید فرهیخته و فرزانه ام جناب آقای دکتر "سعید قره چلو" و استاد بزرگوارم جناب

آقای دکتر "سعید گلپایگان" آموزگارانی که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند و تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین بر خود لازم می دانم از دوستان عزیزم به خصوص خانم های نازنین نوزاد پور و آسیان یا حید که در طول مراحل انجام

پایان نامه مرایاری و بحاری نمودند از صمیم قلب تشکر نمایم.

تهدنامه

این جانب فاطمه رفیعی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی و مدیریت منابع آب دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی فرونشست زمین و رفتار متقابل آبخوان با استفاده از تکنیک‌های تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت سملقان) تحت راهنمایی جناب آقای سعید قره‌چلو و جناب آقای سعید گلیان متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بانام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

چکیده

تغییرات اقلیمی جهانی و رشد جمعیت، منجر به افزایش تقاضای آب‌های زیرزمینی شده است. خطر فرونشست زمین به دلیل پمپاژ آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب از جمله خطرات زیست‌محیطی است که خسارات زیادی به جوامع وارد می‌کند. فرونشست به معنی فروریزش زمین است که دارای بردار جابه‌جایی افقی اندکی باشد. دشت سملقان یکی از دشت‌های کشاورزی در استان خراسان شمالی است که بر اساس اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای این استان، بیشترین منابع آب زیرزمینی از چاه‌های عمیق این دشت استخراج می‌شود و در شرایط بحرانی قرار دارد. تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری به دلیل دقت و سرعت پایش قابل قبول، در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. در این مطالعه به منظور مطالعه فرونشست زمین در اثر افت آب‌های زیرزمینی در دشت سملقان با بهره‌گیری از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری از داده‌های بالا گذر و پایین گذر ماهواره Sentinel-1، ۳۵ تداخل نگار در بازه ۲۰۲۰-۲۰۱۴ توسط نرم‌افزار رایگان SNAP تولید و بررسی شده است. مقایسه نتایج پردازش داده‌های بالا گذر و پایین گذر الگوی یکسانی از جابه‌جایی زمین را نشان داد. نقشه‌های هم‌سطح و هم افت آب زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شده و ارتباط آن با فرونشست مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ارتباط فعالیت‌های تکتونیکی، وضعیت زمین‌شناسی دشت و پوشش گیاهی منطقه نیز با فرونشست بررسی شدند. نقشه‌های تولید شده نشان‌دهنده ارتباط مستقیم افت آب با فرونشست در آبخوان سملقان بوده‌اند. حداکثر فرونشست در این دشت در سال ۲۰۱۹ مقدار بیشینه ۳۴ سانتی‌متر داشته و حداقل ۱۸ سانتی‌متر در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ برآورد شده است. نرخ

فرونشست حداکثر در دشت سملقان سالانه ۱۲ سانتی متر و روزانه ۰,۳۴ میلی متر اندازه گیری شد. افت میانگین سطح آب زیرزمینی سالانه ۰,۴۷ متر برآورد شده است. بررسی ها نشان داده است فرونشست غالباً در مناطقی که حاوی ریزدانه زیادی هستند به وقوع پیوسته است. درنهایت با توجه به رفتار زمین در منطقه مورد مطالعه ایده هایی به منظور کنترل فرونشست در منطقه داده شده است.

کلمات کلیدی: فرونشست، آب های زیرزمینی، تداخل سنجی راداری، رفتار متقابل آبخوان، دشت

سملقان

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- رفیعی، ف.، قره‌چلو، س. و گلیان، س. (۱۳۹۹) "ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست دشت سملقان با استفاده از تداخل سنجی راداری" دانشگاه اراک، اولین کنفرانس ملی داده‌کاوی علوم زمین.

2- Rafiee. F., Gharechelou. S. & Golian. S. (2021) "Land subsidence monitoring using DInSAR technique (Case study: Semalghan plain)"Ferdowsi University of Mashhad, 12th International congress on civil engineering (Accepted)

3- Rafiee. F., Gharechelou. S., Golian. S. & Nozarpour. N. (2021) "Recharge and Discharge Zones Identification using GIS (Case study: Semalghan plain)"Ferdowsi University of Mashhad, 12th International congress on civil engineering (Accepted)

فهرست مطالب

و	فهرست جداول
ز	فهرست اشکال
ل	فهرست علائم
۱	فصل ۱: کلیات تحقیق
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱- تعاریف و کلیات
۴	۱-۲-۱ آب‌های زیرزمینی
۵	۲-۲-۱ استخراج بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی
۶	۳-۲-۱ فرونشست
۱۱	۴-۲-۱ رفتار متقابل آبخوان
۱۳	۵-۲-۱ روش‌های پایش فرونشست
۲۱	۶-۲-۱ داده‌های ماهواره راداری
۲۳	۱-۶-۲-۱ داده‌های ماهواره راداری Sentinel-1
۲۴	۳-۱ بیان موضوع
۲۵	۴-۱ اهمیت و ضرورت انجام تحقیق
۲۶	۵-۱ اهداف و سؤالات تحقیق

۶-۱- فصل بندی پایان نامه ۲۷

فصل ۲: پیشینه تحقیق ۲۹

۱-۲- مقدمه ۳۰

۲-۲- پایش فرونشست در جهان ۳۰

۳-۲- سابقه‌ی پایش فرونشست در ایران ۳۴

۴-۲- جمع بندی ۴۱

فصل ۳: مواد و روش ها ۴۳

۱-۳- مقدمه ۴۴

۲-۳- منطقه مورد مطالعه ۴۴

۱-۲-۳- موقعیت جغرافیایی ۴۴

۲-۲-۳- زمین شناسی ۴۵

۴-۲-۳- عناصر اقلیمی منطقه ۴۷

۵-۲-۳- وضعیت منابع آبی دشت ۵۰

۶-۲-۳- گسل ها ۵۱

۳-۳- داده ها ۵۱

۱-۳-۳- داده های ماهواره ای ۵۲

۲-۳-۳- داده های پیزومتری ۵۳

۴-۳- پردازش داده های SAR ۵۴

۱-۴-۳- داندود و آماده سازی داده های ماهواره راداری Sentinel-1 ۵۳

۵۷.....	۳-۴-۲- پردازش
۶۰.....	۳-۵- ابزارهای تحقیق
۶۰.....	۳-۵-۱- سیستم‌های کامپیوتری موردنیاز
۶۰.....	۳-۵-۲- نرم‌افزار SNAP
۶۱.....	۳-۵-۳- نرم‌افزار GIS
۶۲.....	۳-۵-۴- نرم‌افزار ENVI
۶۳.....	۳-۵-۵- نرم‌افزار Excel
۶۳.....	۳-۶- مراحل انجام تحقیق

فصل ۴: نتایج تحقیق ۶۷

۶۸.....	۴-۱- مقدمه
۶۸.....	۴-۲- پردازش داده‌های ماهواره‌ای
۶۹.....	۴-۲-۱- انتخاب زوج تصاویر
۷۰.....	۴-۲-۲- ثبت هندسی تصاویر
۷۲.....	۴-۲-۳- تولید تداخل نگار
۷۲.....	۴-۲-۴- اتصال قطعه‌های تصاویر
۷۳.....	۴-۲-۵- حذف اثر توپوگرافی
۷۴.....	۴-۲-۶- چند منظرسازی
۷۴.....	۴-۲-۷- اعمال فیلتر گلداشتاین
۷۵.....	۴-۲-۸- بازیابی فاز

۷۷.....	۹-۲-۴- تبدیل فاز به جابه‌جایی
۷۹.....	۱۰-۲-۴- زمین مرجع کردن
۸۰.....	۱۲-۲-۴- تحلیل و بررسی نقشه‌های جابه‌جایی
۸۹.....	۳-۴- بررسی آب‌های زیرزمینی
۸۹.....	۱-۳-۴- نقشه‌های هم سطح آب زیرزمینی
۹۲.....	۲-۳-۴- تغییرات سطح آب زیرزمینی
۹۸.....	۳-۳-۴- نقشه‌ی جهت آب زیرزمینی
۱۰۰.....	۴-۳-۴- ارتباط افت سطح آب زیرزمینی با فرونشست
۱۰۳.....	۴-۴- بررسی رفتار متقابل آبخوان
۱۰۸.....	۵-۴- ارتباط خاک با فرونشست
۱۰۹.....	۱-۵-۴- بررسی تحت‌الارضی
۱۱۲.....	۶-۴- ارتباط تغییرات پوشش گیاهی با فرونشست
۱۱۶.....	۷-۴- ارتباط زمین‌لرزه‌ها با فرونشست
۱۱۷.....	۸-۴- شواهد فرونشست در منطقه
۱۱۹.....	۲-۸-۴- ایجاد درز و ترک‌های دیوار
۱۲۰.....	۳-۸-۴- ایجاد چاله
۱۲۱.....	۹-۴- صحت سنجی
۱۲۳.....	۱۰-۴- کنترل فرونشست
۱۲۴.....	۱-۱۰-۴- مدیریت منابع آب
۱۲۵.....	۲-۱۰-۴- بهسازی خاک

فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادات

۱۲۷

۱-۵- مقدمه ۱۲۸

۲-۵- جمع‌بندی ۱۲۸

۳-۵- آزمون فرضیات ۱۲۸

۴-۵- محدودیت‌ها و پیشنهادات ۱۳۰

پیوست

۱۳۲

نمودارهای تنش-کرنش چاه‌های پیزومتری دشت سملقان ۱۳۲

نقشه‌های جابه‌جایی ۱۳۴

پلات‌های جابه‌جایی ۱۳۷

مراجع

۱۴۰

فهرست جداول

جدول ۱-۱. باندهای مورد استفاده در سنجنده‌های راداری	۲۲
جدول ۲-۱. ویژگی‌های اصلی حالت تصویربرداری IW شریفی	۲۴
جدول ۱-۳. سازندهای تشکیل دهنده دشت سملقان	۴۶
جدول ۲-۳. ویژگی‌های تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش	۵۲
جدول ۳-۳. اطلاعات چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه در این پژوهش	۵۳
جدول ۱-۴. تداخل نگارهای ایجاد شده برای تصاویر بالا گذر	۶۹
جدول ۲-۴. تداخل نگارهای ایجاد شده برای تصاویر پایین گذر	۶۹
جدول ۳-۴. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و برآزش داده‌های ۲ سال آخر	۹۸
جدول ۴-۴. مقدار ضریب ذخیره برآورد شده در موقعیت هر چاه پیزومتری	۱۰۴
جدول ۵-۴. میانگین تغییرات سطح زمین در ۴ بازه‌ی انتخابی مورد مطالعه در فواصل مختلف از چاه‌های	
مشاهداتی، نسبت میزان بالآمدگی به فرونشست و نسبت زمانی بالآمدگی به فرونشست	۱۰۶
جدول ۶-۴. وضعیت تغییرات پوشش گیاهی از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۲۰	۱۱۶
جدول ۸-۴. همبستگی میزان فرونشست پایش شده برای داده‌های بالاگیر و پایین گذر در موقعیت	
چاه‌های پیزومتری دشت سملقان	۱۲۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. مقطع شماتیک آب زیرزمینی با رسوبات نسبتاً درشت (آکی تارد) و دانه ریز (آکیفر) - (الف) در حالت تعادل هیدرودینامیکی اصلی، (ب) بر هم زدن تعادل اولیه در نتیجه ی پمپاژ آب های زیرزمینی و تراکم سفره و در نتیجه فرونشست زمین ۷
- شکل ۱-۲. الگوی فرونشست زمین ۸
- شکل ۱-۳. کاهش حجم لایه ی ریزدانه و نازک شدن آن، (الف) قبل از زهکشی و (ب) بعد زهکشی ۸
- شکل ۱-۴. پاسخ سیستم آب زیرزمینی به تخلیه و تغذیه از نظر تغییر در میزان ذخیره آبخوان، هد آب زیرزمینی و تراکم سیستم آب زیرزمینی که منجر به فرونشست زمین در آبخوان های باز و بسته می شود ۱۲
- شکل ۱-۵. پراکندگی ایستگاه های شبکه ژئودینامیک کشور ۱۵
- شکل ۱-۶. خط مبنای مکانی در راستای دید سنجنده ۱۶
- شکل ۱-۷. اصول تداخل سنجی تفاضلی راداری ۲۰
- شکل ۱-۸. نقشه ی حاصل از اندازه گیری های PSI ۲۰
- شکل ۱-۹. نتایج روش SBAS به منظور پایش فرونشست ۲۱
- شکل ۱-۱۰. سنجنده های راداری با دریچه مصنوعی ۲۲
- شکل ۱-۱۱. ماهواره ی Sentinel-1 ۲۳
- شکل ۱-۱۲. حالت های عملیاتی ماهواره Sentinel-1 ۲۴
- شکل ۳-۱. موقعیت منطقه ی مورد مطالعه ۴۵
- شکل ۳-۲. نقشه زمین شناسی دشت سملقان (برگرفته از نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰) ۴۶
- شکل ۳-۳. توده های هوایی تأثیر گذار بر منطقه ۴۹

- شکل ۳-۴. اقلیم دشت سملقان با استفاده از اقلیم نمای آمبرژه ۴۹
- شکل ۳-۵. موقعیت چاه‌های تخلیه و پیزومتری نسبت به دشت، آبخوان و آب‌های سطحی دشت سملقان، با تأکید بر پراکندگی و میزان تخلیه‌ی آن‌ها ۵۰
- شکل ۳-۶. موقعیت گسل‌های فعال نسبت به دشت سملقان ۵۱
- شکل ۳-۷. موقعیت چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه در دشت سملقان ۵۴
- شکل ۳-۸. انتخاب ویژگی‌های تصاویر Sentinel-1 مورد نیاز جهت انجام پردازش‌های تداخل‌سنجی راداری در سایت Asf.alaska.edu ۵۵
- شکل ۳-۹. موقعیت یک قاب از داده‌های موجود در سال ۲۰۲۰ برای محدوده‌ی سملقان در حالت تصویربرداری بالا گذر ۵۶
- شکل ۳-۱۰. زیر نوارها و قطعات داده‌های Sentinel-1 IW SLC ۵۶
- شکل ۳-۱۱. تفاوت بین فاز تداخل نگار قبل و بعد از بازیابی فاز - (۱) قبل از انجام بازیابی فاز (۲) بعد از بازیابی فاز ۵۹
- شکل ۳-۱۲. ساختار کلی انجام تحقیق ۶۶
- شکل ۴-۱. مراحل انجام تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری در نرم‌افزار SNAP ۶۸
- شکل ۴-۲. زیر نوار IW2 و موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه در مستطیل‌های سفیدرنگ ۷۰
- شکل ۴-۳. (الف) همدوسی پشت‌پشته‌ی تشکیل‌شده D11 (ب) تصویر فاز تداخل نگار D11 ۷۱
- شکل ۴-۴. تنظیمات مورد نیاز برای تهیه‌ی تداخل نگار در نرم‌افزار SNAP ۷۲
- شکل ۴-۵. تصویر (الف) همدوسی و (ب) فاز حاصل از اتصال قطعات زیر نوار IW1 تداخل نگار D11 ۷۳
- شکل ۴-۶. تداخل نگار D11 پس از حذف اثر توپوگرافی و انجام عملیات چند منظر سازی ۷۴
- شکل ۴-۷. تداخل نگار D11 پس از اعمال فیلتر گلداشتاین ۷۵

- شکل ۴-۸. اجرای بازیابی فاز توسط الگوریتم SNAPHU، (الف) خروجی گرفتن از نرم افزار SNAP، (ب) اجرای دستور در ترمینال لینوکس ۷۶
- شکل ۴-۹. تداخل نگار D11 بعد از اعمال بازیابی فاز ۷۷
- شکل ۴-۱۰. نقشه‌ی جابه‌جایی ۷۸
- شکل ۴-۱۱. زمین مرجع نمودن نقشه‌ی جابه‌جایی، (الف) تنظیمات اعمال شده به نرم افزار SNAP و (ب) نقشه جابجایی پس از انجام عملیات زمین مرجع نمودن ۸۰
- شکل ۴-۱۲. جابه‌جایی تجمعی تصاویر پایین گذر مربوط به سال‌های (الف) ۲۰۱۵، (ب) ۲۰۱۶، (ج) ۲۰۱۷، (د) ۲۰۱۸، (ه) ۲۰۱۹ و (و) ۲۰۲۰ ۸۳
- شکل ۴-۱۳. گراف تغییرات سطح زمین در سال ۲۰۱۷ در راستای شمال شرق-جنوب غرب آبخوان سملقان ۸۵
- شکل ۴-۱۴. موقعیت مناطقی که در آن‌ها فرونشست و بالآمدگی در طول زمان رؤیت شده ۸۶
- شکل ۴-۱۵. نقشه جابه‌جایی کل دشت سملقان در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۲۰ ۸۷
- شکل ۴-۱۶. نمودار تغییرات ارتفاعی زمین در شهرهای آشخانه و چمن بید به صورت سالانه و تجمعی ۸۸
- شکل ۴-۱۷. درصد مصارف مختلف آب زیرزمینی در دشت سملقان ۸۹
- شکل ۴-۱۸. نقشه هم سطح آب‌های زیرزمینی دشت سملقان در سال‌های، (الف) ۱۳۸۷، (ب) ۱۳۹۳ و (ج) ۱۳۹۷ ۹۲
- شکل ۴-۱۹. روند تغییرات میانگین سطح آب‌های زیرزمینی در بازه‌ی ۱۰ ساله ۹۳
- شکل ۴-۲۰. (الف) افت سطح آب زیرزمینی از سال ۸۷ تا ۹۷، (ب) افت سطح آب زیرزمینی از سال ۹۳ تا ۹۷ در دشت سملقان ۹۴
- شکل ۴-۲۱. نمودار میله‌ای سطح آب زیرزمینی در چاه‌های پیژومتری منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۳، ۱۳۹۷ ۹۵

- شکل ۴-۲۲. سطح آب ۱۷ چاه مشاهداتی نسبت به سطح زمین در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۷-۱۳۹۷ ۹۷
- شکل ۴-۲۳. متوسط افت سطح آب بر اساس متر بر سال برای بازه‌ی ۹۷-۹۳ ۹۸
- شکل ۴-۲۴. نقشه جهت حرکت آب‌های زیرزمینی ۱۰۰
- شکل ۴-۲۵. پراکندگی پیزومترهای موجود در دشت و افت سطح آب در آن‌ها و موقعیت این چاه‌ها نسبت به فرونشست رخ داده در منطقه ۱۰۱
- شکل ۴-۲۶. برش منطقه و بررسی پلات‌های جابه‌جایی ۱۰۲
- شکل ۴-۲۷. نمودار تنش-کرنش مربوط به چاه W4 ۱۰۳
- شکل ۴-۲۸. مقدار ضریب ذخیره درونیابی شده آبخوان، با استفاده از روش IDW ۱۰۵
- شکل ۴-۲۹. نمودار میانگین تغییرات سطح زمین در فاصله‌ی ۲۵۰ متری از چاه‌های مشاهداتی منطقه ۱۰۶
- شکل ۴-۳۰. محل چاه‌های نمونه‌برداری کیفی و دارای لاگ حفاری ۱۱۰
- شکل ۴-۳۱. لاگ حفاری چاه‌ها در راستای AA' ۱۱۱
- شکل ۴-۳۲. لاگ حفاری چاه‌ها در راستای BB' ۱۱۱
- شکل ۴-۳۳. لاگ حفاری در راستای CC' ۱۱۲
- شکل ۴-۳۴. نقشه‌ی پوشش گیاهی دشت سملقان (الف) سال ۲۰۱۵ و (ب) سال ۲۰۲۰ ۱۱۴
- شکل ۴-۳۵. نمودار میله‌ای مساحت طبقات پوشش گیاهی در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ ۱۱۶
- شکل ۴-۳۶. مرکز نزدیک‌ترین زلزله‌های رخ داده از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ و موقعیت آن‌ها نسبت به دشت ۱۱۷
- شکل ۴-۳۷. برخی شواهد فرونشست در دشت سملقان (۱۳۹۹، ۱۱، ۰۶ - توسط نگارنده) ۱۱۸
- شکل ۴-۳۸. نمایی از توسعه‌ی شکاف‌های دشت (۱۳۹۹، ۱۱، ۰۶ - توسط نگارنده) ۱۱۹
- شکل ۴-۳۹. ترک دیوار در هنرستان کشاورزی (۱۳۹۹، ۱۱، ۰۶ - توسط نگارنده) ۱۲۰

شکل ۴-۴۰. ایجاد چاله در مکان‌های مختلف دشت سملقان (۱۳۹۹, ۱۱, ۰۶ - توسط نگارنده)..... ۱۲۱

شکل ۴-۴۱. نقشه‌های جابه‌جایی تجمعی سالانه برای داده‌های بالا گذر، (الف) سال ۲۰۲۰، (ب) سال

۲۰۱۹ و (ج) سال ۲۰۱۸..... ۱۲۳

فهرست علائم

SAR	دهانه دیافراگم مصنوعی
InSAR	تداخل سنجی راداری روزنه مصنوعی
DInSAR	تداخل سنجی تفاضلی راداری
PSI – PSInSAR	تداخل سنجی تفاضلی بر پایه پراکنش گرهای دائمی
SBAS – SBAS InSAR	تداخل سنجی تفاضلی بر پایه خط مبنای کوتاه
Subsidence	فرونشست
Uplift	بالا آمدگی
Elastic deformation	فرونشست الاستیک
Inelastic deformation	فرونشست غیرالاستیک
Baseline	خط مبنا
Temporal baseline	خط مبنای زمانی
Spatial baseline	خط مبنای مکانی

فصل ۱: کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

سفره‌های آب زیرزمینی یکی از منابع پراهمیت هر کشور می‌باشند. با توجه به رشد جمعیت و افزایش نیاز به این منابع بالارزش، استخراج بی‌رویه از آن‌ها به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. استخراج بی‌رویه هنگامی رخ می‌دهد که طی چند سال، میانگین میزان برداشت از منبع موردنظر، از میانگین میزان تغذیه و ورودی به آن بیشتر باشد. این مسئله باعث برهم خوردن تعادل آبخوان می‌شود [1].

استخراج بی‌رویه سیالات از زمین، فشار آب حفره‌ای را کاهش می‌دهد و این مسئله موجب می‌شود تنش مؤثر در رسوبات تحکیم نیافته افزایش یابد. این افزایش تنش باعث فشردگی سفره‌های آب زیرزمینی و آبخوان‌های بسته می‌شود و سطح زمین را با افت مواجه می‌کند. این افت زمین که به آن فرونشست گفته می‌شود می‌تواند موجب تغییر شکل سطح زمین شود.

فرونشست شهرها و مناطق زیادی را در جهان تحت تأثیر قرار داده و خسارات زیادی به آن‌ها وارد کرده است. به طور مثال در دره سن جاکوئین کالیفرنیا در ۵۰ سال گذشته ۸٫۵ متر فرونشست ایجاد شده است. تا انتهای سال ۲۰۰۵ در بیش از ۵۰ شهر چین فرونشست ثبت و مشاهده شده است که در این میان بیش‌ترین آن‌ها در تیتجانی به مقدار ۳٫۱۸۷ متر اعلام شده است [2].

ایالت‌های آریزونا و کالیفرنیا، آمریکا، توکیو و اوساکا در ژاپن، بانکوک در تایلند، جاکارتا در اندونزی، هانوی در ویتنام، مکزیکوسیتی در مکزیک از جمله مناطق مهم در جهان می‌باشند که با این پدیده مواجه هستند [3]. در ایران نیز به علت شرایط اقلیمی خشک حاکم بر اغلب نواحی داخلی و تمرکز بر منابع آبی زیرزمینی به منظور تأمین نیازهای مختلف، پدیده فرونشست سابقه‌ای به نسبت طولانی دارد و احتمال می‌رود بیش از سیصد دشت ایران در معرض پدیده فرونشست باشند [4].

از روش‌های مختلفی به منظور پایش فرونشست استفاده می‌شود. در گذشته فرونشست با استفاده از مشاهدات محلی و اندازه‌گیری جدار بریده شده لوله چاه‌ها اندازه‌گیری می‌شد [5]. امروزه با پیشرفت تکنولوژی از سه روش اصلی به منظور اندازه‌گیری دامنه فرونشست استفاده می‌شود که شامل ترازابی

دقیق، ایستگاه‌های دائمی سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۱ و تداخل سنجی راداری می‌باشند [6]. همچنین، اندازه‌گیری فشردگی آبخوان و سطح آب زیرزمینی فهم تغییرات ارتفاعی زمین را تحت تأثیر فرآیندهای مختلف بهبود می‌بخشد [7]. یکی از روش‌های سنجش‌ازدور که تاکنون مورد بهره‌برداری قرار گرفته تداخل سنجی راداری است که از دقیق‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های پایش فرونشست است [5]. از تداخل سنجی راداری به‌منظور شناسایی و نمایش جابه‌جایی‌های به وجود آمده در سطح زمین استفاده می‌شود. روش نام‌برده با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای به علت فراوانی مکانی و زمانی مشاهدات، موجب صرفه‌جویی در زمان، مکان و هزینه شده و به همین علت در مقایسه با سایر روش‌ها استفاده از آن بسیار متداول است [8]. این روش بررسی میزان و دامنه فرونشست در تمام محدوده موردبررسی را امکان‌پذیر کرده و امکان پایش آن را برای تمام نقاط محدوده در دوره‌های زمانی مختلف فراهم آورده است [5].

یکی از دقیق‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های تداخل‌سنجی راداری، تداخل سنجی تفاضلی راداری است که برای شناسایی حرکات زمین با دقت و توان تفکیک مکانی در حد سانتی‌متر و حتی میلی‌متر در بازه زمانی موردنظر استفاده می‌شود [7]. از این روش به‌منظور پایش انواع جابه‌جایی سطحی زمین مانند فرونشست، زلزله، زمین‌لغزش و سایر فرایندهایی که موجب ایجاد تغییرات در سطح زمین می‌شوند استفاده می‌شود [9].

۲-۱- تعاریف و کلیات

در ادامه پدیده فرونشست، عوامل مؤثر بر رخداد آن و مفاهیم اصلی و پایه تداخل سنجی راداری به‌اختصار شرح داده خواهد شد.

^۱ Components of Global Positioning Systems (CGPS)

۱-۲-۱- آب‌های زیرزمینی

آب‌های زیرزمینی یکی از اعضای مهم چرخه هیدرولوژیکی می‌باشند که دو نقش اساسی را بر عهده دارند، این آب‌ها منبعی برای تأمین نیازهای انسان بوده و در تعادل طبیعت نیز نقش مهمی ایفا می‌کنند این آب‌ها به‌عنوان یک منبع برای تأمین نیازهای انسانی، منبعی کلیدی برای تأمین نیازهای شهری و روستایی، منبعی استراتژیک در صورت کمبود و مشکلات سایر منابع آبی در اثر خشک‌سالی و خرابی‌های عمده و آلودگی‌ها، منبعی مهم اجتماعی به‌منظور توسعه آبیاری و کشاورزی و همچنین منبعی قابل‌اطمینان در تأمین نیازهای صنعتی می‌باشند [1]. این منابع از ارزشمندترین منابع آب هستند که حدود ۹۹٪ آب شیرین قابل‌مصرف را تأمین می‌کنند. بیش از ۱٫۵ میلیارد نفر در سراسر جهان از ذخایر آب‌های زیرزمینی برای آشامیدن و مصارف دیگر استفاده می‌کنند. جریان و ذخیره آب‌های زیرزمینی به‌طور مداوم در واکنش به رفتارهای انسانی و تغییرات طبیعی و اقلیمی تغییر می‌کنند [10].

آب‌های زیرزمینی منبع اساسی تأمین آب بسیاری از جمعیت کره زمین می‌باشند و در طی دوران خشک‌سالی برداشت از این منابع آبی افزایش یافته است. این مسئله موجب شده است که تنش زیادی بر سیستم آبخوان‌ها وارد شود و در زمانی که بین تغذیه و تخلیه آبخوان موردنظر تعادل خوبی برقرار نباشد، مخازن آب زیرزمینی با کاهش حجم مواجه شوند [11]. برداشت بی‌رویه از این منابع در بسیاری از مناطق موجب افت شدید سطح آب‌شده است. طبق آمار ارائه‌شده، افت سالانه سطح آب زیرزمینی و کسری مخازن آب زیرزمینی به‌وضوح قابل‌مشاهده است [12]. افزایش نیاز به آب با توجه به تغییرات آب‌وهوایی و در نتیجه آن تغییرات الگوی بارش، و همچنین رشد جمعیت موجب شده که در سرزمین‌های خشک و نیمه‌خشک نیاز به مطالعات منطقه‌ای جدید، از جمله نیاز به مدیریت آبخوان‌ها و چاه‌ها، مطالعه و شناسایی نقاط مستعد فرونشست و فرو چاله، اصلاح زمین‌های دارای فرونشست مانند مطالعات درباره تغذیه مصنوعی، در مورد رفتار آبخوان و ... ایجاد شود.

۱-۲-۲- استخراج بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی

استخراج آب‌های زیرزمینی می‌تواند سبب ایجاد صدمه به زمین در زیرساخت ساختمان‌ها و زیرساخت‌های شهری شود [13]. در مناطق وابسته به آب زیرزمینی در صورت خشک‌سالی‌های پیاپی و کاهش منابع آبی، خطر تهی شدن سفره‌های آبی تشدید می‌گردد و چالش‌های جدی به وجود می‌آورد [14]. بهره‌برداری از آبخوان‌ها، به‌ویژه در فصول خشک، به‌منظور مصارف شهری و کشاورزی موجب تخریب مخازن و پیشروی آب‌شور به آن‌ها شده است [15] و [16].

استخراج بی‌رویه باعث می‌شود بار هیدرولیکی^۱ چاه‌ها افت کند، با کاهش فشار آب منفذی [1] و کاهش فشار هیدرو استاتیک ساختمان سفره پایداری خود را از دست داده، ذرات فشرده می‌شوند و فضای مفید سفره کاهش می‌یابد [14] و همین مسئله موجب ایجاد فرونشست و فرو چاله^۲ در اطراف میادین استخراج می‌شود [1]. پدیده فرونشست در تمامی شرایط اقلیمی اتفاق می‌افتد اما در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارای بیشترین پراکندگی است. بارش کم، نیاز زیاد آبی دشت‌ها و شهرها و افزایش دما که منجر به افزایش استخراج آب‌های زیرزمینی می‌شوند از پارامترهای اقلیمی هستند که در وقوع این پدیده مؤثر می‌باشند [17].

به دلیل افزایش استخراج آب‌های زیرزمینی، نظارت بر تغییرات سطح پیزومتری در مناطق خشک، برای اندازه‌گیری تغییرات ذخیره آب زیرزمینی یا باهدف شناسایی مناطق آسیب‌پذیر که در معرض افت ذخایر زیرزمینی هستند، امری ضروری است [13]؛ این نظارت عموماً بر اساس نظارت بر شبکه چاه‌ها با بررسی تغییرات ذخیره آب آن‌ها است. یکی از مشکلات موجود آن است که در بسیاری از مناطق جهان سطوح آب زیرزمینی نظارت ضعیفی دارد، هزینه پیزومترها زیاد بوده و داده‌هایی که در دسترس ما هستند بسیار محدود و پراکنده می‌باشند [18].

^۱ Hydraulic head

^۲ Sink hole

استفاده از مدل‌های عددی جریان آب زیرزمینی برای شناخت رفتار هیدرودینامیکی منطقه و تکنیک‌های تداخل سنجی مانند تداخل سنجی تفاضلی راداری به منظور شبیه‌سازی تغییرات مکانی و زمانی سطح پیزومتریک، به یک رویکرد جهانی به منظور ارزیابی تهدیدات آبخوان تبدیل شده‌اند [19].

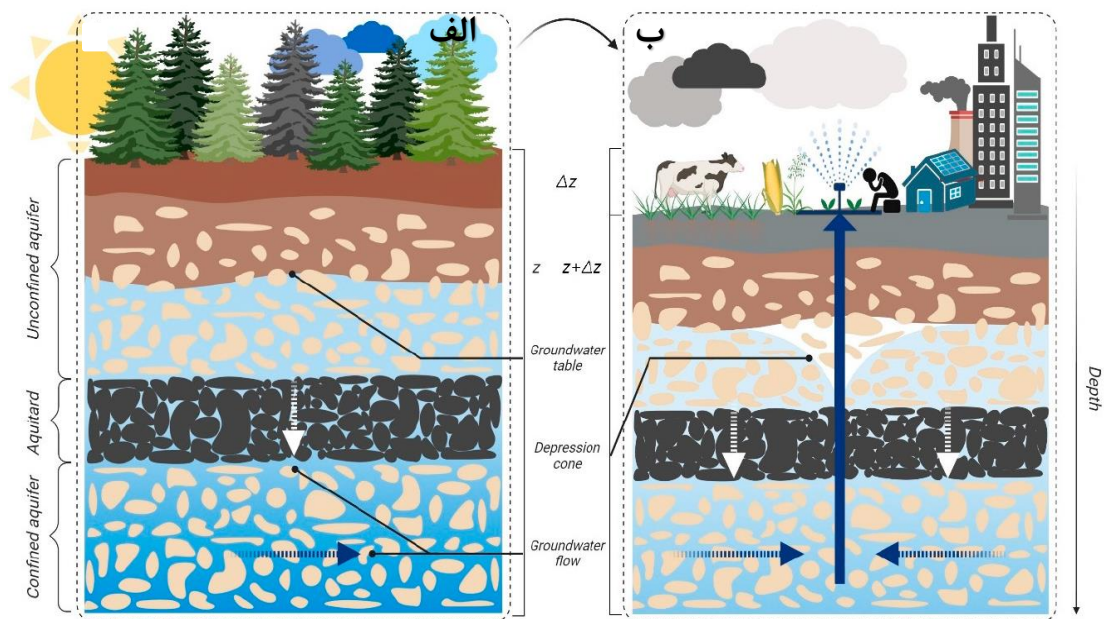
۱-۲-۳- فرونشست

طبق تعریف موسسه زمین‌شناسی ایالات متحده^۱، فرونشست به معنی فروریزش رو به پایین زمین که دارای بردار جابه‌جایی افقی اندکی باشد است که از نظر وسعت، شدت و میزان منطقه محدودیتی ندارد [21]. خطر فرونشست زمین در اثر افت آب‌های زیرزمینی از جمله خطرات زیست‌محیطی است که خسارات زیادی به جوامع وارد می‌کند، به همین دلیل در مقیاس جهانی مورد توجه قرار گرفته است [22]. این فاجعه زیست‌محیطی ناشی از علل مختلف طبیعی و انسانی است که غالباً به علت عوامل انسانی ایجاد می‌شود (شکل ۱-۱) [20].

به‌طور کلی در یک خاک اشباع بخشی از فشار وارده توسط دانه‌های خاک تحمل می‌شود که به آن تنش مؤثر گفته می‌شود؛ قسمتی از این فشار توسط آب تحمل می‌شود که به آن فشار آب حفره‌ای می‌گویند. با افت سطح آب و کاهش فشار آب حفره‌ای، فشار مؤثر بین دانه‌ها افزایش یافته و موجب می‌شود فضای خالی کاهش پیدا کند و نشست ایجاد شود. نشست تحکیمی در اثر بارگذاری و یا افت سطح آب زیرزمینی اتفاق می‌افتد [23].

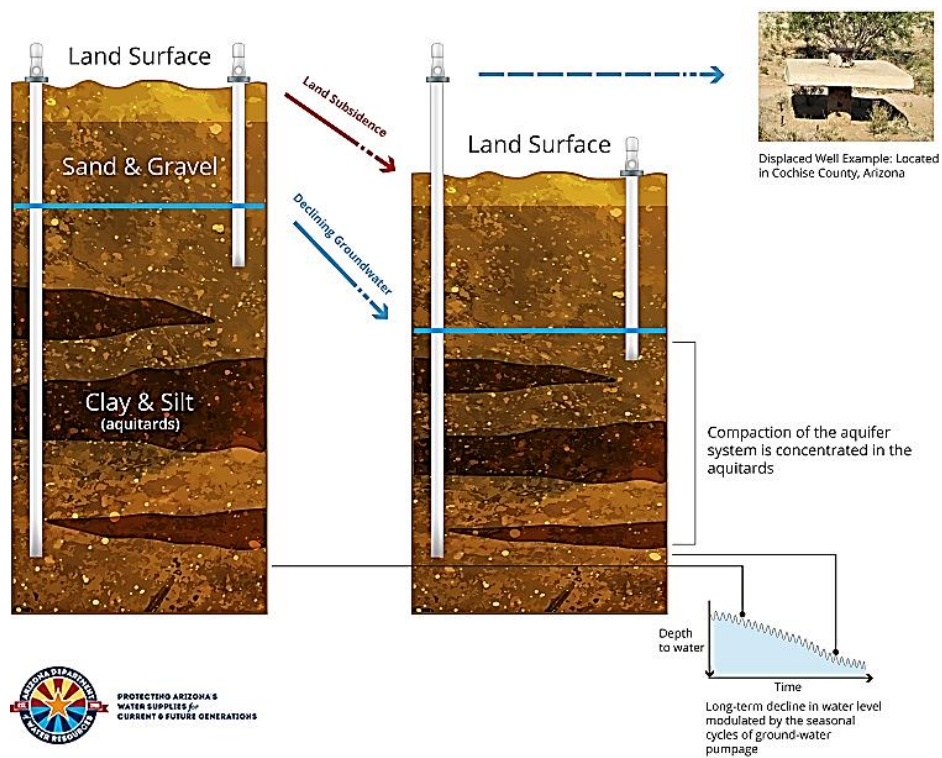
فرونشست زمین با دانه‌بندی خاک رابطه مستقیم دارد [25]، نشست معمولاً در رسوبات تحکیمی تا نیمه تحکیم یافته که در مجاورت لایه‌های شن و ماسه قرار دارند اتفاق می‌افتد (شکل ۱-۲) [26].

^۱ United States Geological Survey (USGS)

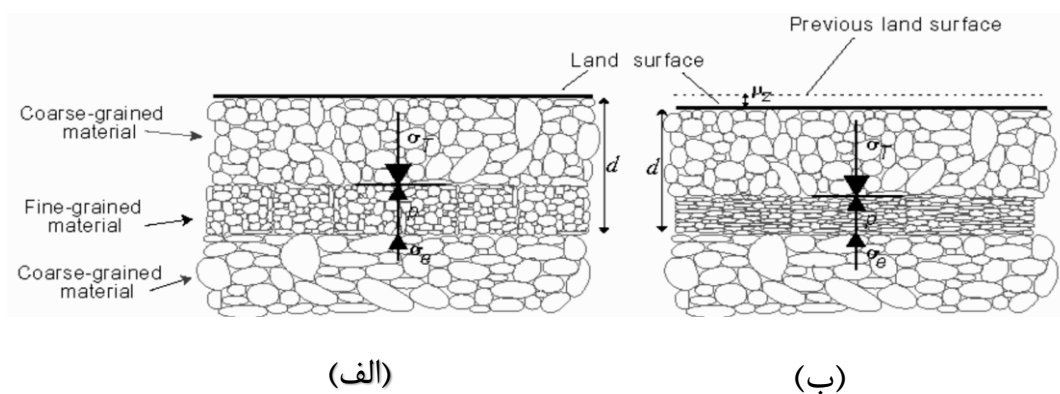


شکل ۱-۱. مقطع شماتیک آب زیرزمینی با رسوبات نسبتاً درشت (آکی تارد) و دانه ریز (آکیفر) - (الف) در حالت تعادل هیدرودینامیکی اصلی، (ب) بر هم زدن تعادل اولیه در نتیجه پمپاژ آب های زیرزمینی و تراکم سفره و در نتیجه فرونشست زمین

فرونشست زمین در اثر افت سطح آب های زیرزمینی در مناطق حاوی خاک ریزدانه زمین نسبت به خاک های درشت دانه بیش تر است. همچنین این مقدار در آبخوان های محصور بیشتر است [27]. این عمل زمان بر بوده و به آهستگی رخ می دهد و در اثر آن به علت کاهش فشار هیدرولیکی زهکشی آب انجام می شود. چیدمان جدید ایجاد شده در لایه های خاک حجم لایه را کاهش می دهد و باعث ایجاد تغییرات در ضخامت عمودی آن می گردد. در برخی موارد در صورت برگشت سطح آب، بازگشت تراکم در لایه های خاک امکان پذیر است. تراکم آبخوان در اثر افت سطح آب های زیرزمینی در شکل ۱-۳ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱-۲. الگوی فرونشست زمین [24]



شکل ۱-۳. کاهش حجم لایه ریزدانه و نازک شدن آن، (الف) قبل از زهکشی و (ب) بعد از زهکشی [26]

این پدیده در بیش از ۱۵۰ شهر جهان گزارش شده است [28]. با توجه به این که ادامه روند پیش رو آسیب‌ها و خسارات بسیاری به مناطق شهری و غیرشهری وارد می‌کند مطالعه این پدیده به امری مهم تبدیل شده است.

۱-۲-۳-۱- انواع فرونشست

پدیده فرونشست به دو صورت گودال و فرونشست از نوع شکم دادن و خمیدگی^۱ ایجاد می‌شود. خمیدگی به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد و وقوع آن در اثر استخراج معادن بوده و وسعت این منطقه ممکن است به چندین میلیون مترمربع نیز برسد. فرونشست به صورت گودال در اثر ریزش سقف معادن صورت گرفته و ممکن است دارای عمقی حدود ده متر و پهنای حدود چهل الی پنجاه متر باشد [29].

۱-۲-۳-۲- عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست

فرونشست می‌تواند ناشی از علل مختلف طبیعی و انسانی باشد. از علل طبیعی فرونشست می‌توان خشکی رسوبات دانه‌ریز، حل شدن سنگ‌آهک و نمک‌ها، تحمیل بار سنگین (از جمله دریاچه‌ها)، اکسید شدن خاک‌های آلی، فشردگی حاصل از ارتعاش (زلزله) [30]، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام زمین و خروج گدازه و از علل انسانی می‌توان فشردگی به علت زهکشی، برداشت مایعات (نفت و آب) و مواد سخت (زغال‌سنگ، گوگرد، طلا و نمک) زیرین، تحمیل بارهای سنگین (ساختمان و سدها) [30]، ریزش قنوات [7] و ... اشاره کرد. مهم‌ترین علت نشست زمین در حوضه‌های رسوبی، بهره‌برداری بیش‌ازحد از سفره‌های آب زیرزمینی و تراکم آن‌ها است [31]. جهت پایش نقاط مستعد فرونشست و تهیه نقشه خطر می‌توان هفت عامل هیدروژئولوژیکی شامل افت سطح آب زیرزمینی،

^۱ Sag subsidence

محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و تلفیق آن‌ها را مورد مطالعه قرار داد [32].

۱-۲-۳- آسیب‌های ناشی از فرونشست

مطالعات انجام‌شده بر روی آبخوان‌هایی که در معرض فرونشست قرار گرفته‌اند نشان داده است که فرونشست اثرات متفاوتی در این مناطق بر جای گذاشته که اهم آن‌ها به‌صورت فهرست‌وار ذکر خواهد شد [33] و [34] :

- کاهش تمام یا قسمتی از ظرفیت مخازن آب زیرزمینی به‌صورت غیرقابل‌بازگشت در اثر کاهش یا از بین رفتن یا کاهش تخلخل مفید نهشته‌های آبخوان آبرفتی
- تخریب شبکه‌های آبیاری و زهکشی و سامانه‌های انتقال آب، خراب شدن ساختمان چاه‌های کشاورزی، لوله زایی چاه‌ها و وارد شدن خسارت به آن‌ها
- کاهش تخلخل خاک‌های حاصلخیز کشاورزی و تخریب بافت آن‌ها
- آسیب به مناطق شهری و روستایی از جمله ساختمان‌ها، سازه‌ها، راه‌ها و خطوط راه‌آهن
- آسیب به خطوط انتقال نیرو و انرژی
- ایجاد مشکلات در شبکه آبرسانی سطحی با تغییر شیب زمین و همچنین تغییر در سرعت و جهت جریان آب زیرزمینی و ایجاد عدم تعادل در بیلان آبی منطقه
- شکل‌گیری مشکلات چشم‌گیر در هیدرولوژی منطقه با تغییر در وضع توپوگرافی، مثلاً ایجاد سیلاب‌های عظیم و مخرب
- ایجاد شکاف و گسل در سطح زمین
- شکاف‌های زمین که به آهستگی گسترش پیدا می‌کنند شاید تأثیر خطرهای ناگهانی و فاجعه‌بار مانند سیل و زلزله را نداشته باشند، با این‌وجود معمولاً خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف‌های زمین ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب هستند [6].

۱-۲-۴- رفتار متقابل آبخوان

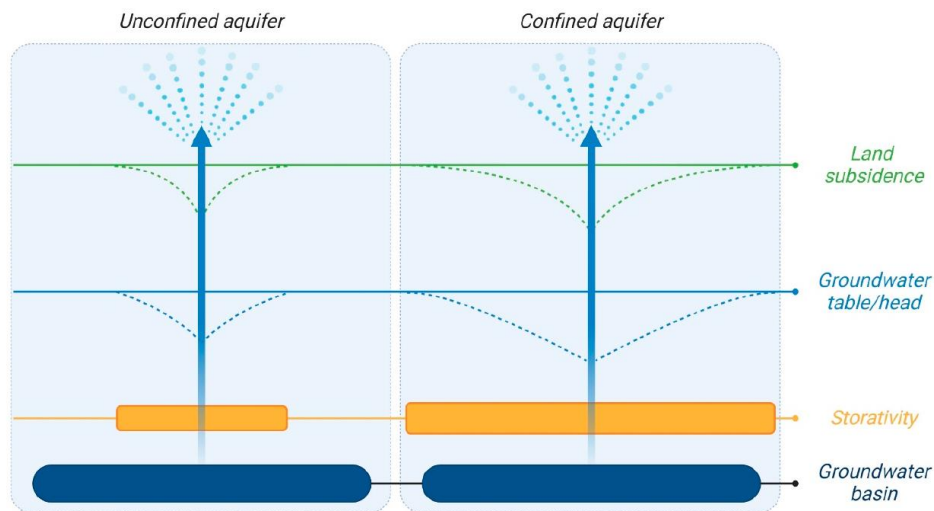
تراکم‌پذیری ماتریس آبخوان فرونشست زمین ناشی از افت آب‌های زیرزمینی را کنترل می‌کند [35]. قابلیت تراکم‌پذیری اسکلتی یک‌بعدی آبخوان (α) را می‌توان بر اساس نسبت کرنش عمودی به تنش مؤثر عمودی به صورت معادله ۱-۱ تعریف کرد.

$$\alpha = \frac{\frac{\Delta b}{b_0}}{\Delta \sigma'_{zz}} \quad (1-1)$$

در این معادله b_0 برابر با ضخامت اولیه و $\Delta b = b - b_0$ تغییرات ضخامت آبخوان است. کرنش عمودی می‌تواند به صورت معادله ۲-۱ تعریف شود. $\Delta \sigma'_{zz}$ تغییرات تنش مؤثر عمودی می‌باشد که برابر است با گزینه میزان تغییرات فشار هیدرو استاتیک.

$$\frac{\Delta b}{b_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0'} \quad (2-1)$$

$\Delta e = e - e_0$ تغییرات نسبت تخلخل است [36]. تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی فرونشست زمین ناشی از پمپاژ آب‌های زیرزمینی معمولاً برای سیستم‌های آبخوان تحکیم نیافته یا نیمه تحکیم یافته، درشت‌دانه و ریزدانه انجام می‌شود که از سفره‌های زیرزمینی و رسوبات نیمه‌تراوا و نفوذناپذیر تشکیل شده‌اند و ضخامت آن‌ها تا چند ده متر متغیر است. لایه‌های نیمه‌تراوا طیف وسیعی از رسوبات ریز نفوذپذیر را پوشش می‌دهد که ممکن است به شکل بسترهای ناپیوسته در سیستم سفره آب باشد یا واحدهای محدودکننده گسترده‌ای باشند که سفره‌های زیرزمینی را از یکدیگر جدا می‌کنند [35]. شعاع مخروط افت با کاهش ذخیره آبخوان افزایش می‌یابد، این مسئله در آبخوان‌های بسته بیشتر از آبخوان‌های باز است (شکل ۴-۱). فرونشست زمین برای آبخوان‌های باز در نزدیک نقاط برداشت بیشتر است، در حالی که برای آبخوان‌های بسته، فرونشست زمین به صورت منطقه‌ای توزیع می‌شود [37].



شکل ۴-۱. پاسخ سیستم آب زیرزمینی به تخلیه و تغذیه از نظر تغییر در میزان ذخیره آبخوان، هد آب زیرزمینی و تراکم سیستم آب زیرزمینی که منجر به فرونشست زمین در آبخوان‌های باز و بسته می‌شود [36]

جابجایی عمودی زمین ممکن است در اثر فشردگی الاستیک (قابل بازیابی) یا غیر الاستیک (ثابت) باشد و متناسب با تغییرات هد آب زیرزمینی و ضخامت لایه‌ای است که فشرده می‌شود. اگر هد آب زیرزمینی بالاتر از پایین‌ترین سطح قبلی (تنش قبل از تحکیم) باقی بماند، تغییر شکل الاستیک هم در سفره‌های زیرزمینی و هم در لایه‌های نیمه‌تراوا رخ می‌دهد. در مقابل، هنگامی که هد آب زیرزمینی به زیر پایین‌ترین سطح قبلی می‌رسد، تراکم غیر الاستیک منجر به جابجایی برگشت‌ناپذیر دانه‌های جامد و کاهش تخلخل در سیستم آب زیرزمینی می‌شود. ذخیره ویژه اسکلتی^۱ را می‌توان برای دامنه تنش الاستیک (معادله ۳-۱) و غیر الاستیک (معادله ۴-۱) تعیین کرد:

$$\sigma'_{zz} \leq \sigma'_{zzmax} \quad (3-1)$$

$$\sigma'_{zz} > \sigma'_{zzmax} \quad (4-1)$$

^۱ S_{sk} (Skeletal specific storage)

که در آن σ'_{zz} تنش مؤثر عمودی قبل از تحکیم است [36]. در مناطقی که برداشت از آبخوان زیاد باشد تغییر شکل اغلب غیر الاستیک است. در صورت تعریف استراتژی‌های کنترل پمپاژ آب زیرزمینی باهدف محدود کردن اثرات نامطلوب آن، اغلب کمی بالآمدگی مشاهده می‌شود [38].

فرونشست‌ها و پیامدهای آن‌ها غالباً سرشتی بازگشت‌ناپذیر دارند؛ اما با توجه به رفتار با آبخوان، مطالعه ساختار زمین‌شناختی، میزان تغذیه و استخراج از آبخوان و غیره این پدیده را می‌توان کنترل نمود تا در مواردی منجر به رفتار بازگشت‌پذیر زمین شود. مطالعات انجام‌شده نشان داده است در آبخوان مادرید اسپانیا [13] ، بلژیک [39]، چندین شهر ژاپن و دره سانتا کلارا در جنوب کالیفرنیا دارای فرونشست الاستیک زمین بوده‌اند [40].

اگر میزان تغذیه در یک آبخوان بیش از میزان استخراج از آن باشد، به‌طور مثال استخراج از آبخوان به‌صورت مدیریت‌شده انجام شود، بارش در سال آماری موردنظر کافی باشد [41] ، نفوذ به سفره کافی باشد، تغذیه مصنوعی به آبخوان صورت گیرد، متراکم سازی با تزریق دوغاب یا بتن خود متراکم به زمین انجام شود [42]، می‌توان افت سطح زمین را تا حدی جبران کرد. تزریق آب، گاز و غیره به سطح زیر زمین به دلایل مختلفی انجام می‌شود که تغذیه آبخوان، جبران فرونشست، ذخیره منابع در مخازن تخلیه‌شده از جمله آن‌ها هستند. پس از تزریق به زمین، بالآمدگی سطح زمین در طی چند ماه یا چند سال بسته به میزان استخراج مایعات بین چند میلی‌متر تا ده‌ها سانتی‌متر مشاهده شده است [40].

۱-۲-۵- روش‌های پایش فرونشست

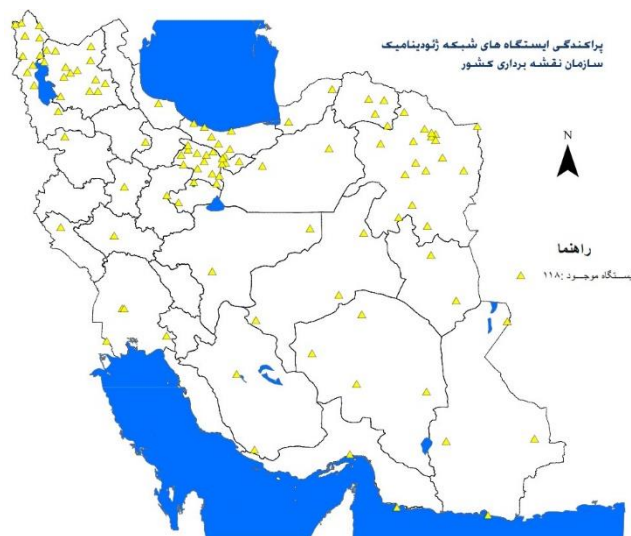
امروزه از روش‌های مختلفی به‌منظور پایش فرونشست استفاده می‌شود. سه روش اصلی ترازیابی دقیق، سامانه موقعیت‌یاب جهانی و تداخل‌سنجی راداری از روش‌هایی هستند که در مطالعه فرونشست به‌وفور استفاده می‌شوند.

۱-۲-۵-۱- روش ترازیبی دقیق

این روش یکی از قدیمی‌ترین و با دقت‌ترین روش‌های نقشه‌برداری برای اندازه‌گیری فرونشست و بالآمدگی زمین است. ترازیبی دقیق در حداقل دو دوره زمانی متناسب با انجام عمل، با نرخ تقریبی فرونشست، می‌توان میزان جابجایی سطح زمین را در آن بازه زمانی محاسبه کرد. با استفاده از این روش، می‌توان تغییرات ارتفاعی را فقط در امتداد مسیر ترازیبی به‌طور معمول در طول جاده، ریل قطار، آبراهه و کانال‌ها مشخص نمود [21]. اگر فاصله زمانی بین دو دوره ترازیبی زیاد باشد، امکان مطالعه دقیق روند فرونشست زمین در بازه زمانی موردنظر وجود ندارد و تغییرات ارتفاعی خطی فرض می‌شود. مهم‌ترین مزیت روش ترازیبی دقت آن است [43]. با این حال وقت‌گیر بودن، هزینه‌بر بودن و افزایش خطا در مقیاس‌های بزرگ اندازه‌گیری، از دلایلی است که در حال حاضر جذابیت استفاده از این روش را کاهش داده است [5].

۱-۲-۵-۲- داده‌های مشاهدات زمینی GPS

استفاده از مشاهدات GPS، به دو صورت مشاهدات ناپیوسته و مشاهدات ایستگاه‌های دائمی پیوسته امکان‌پذیر است. استفاده از مشاهدات پیوسته ایستگاه‌های دائمی، دارای مزیت بررسی رفتار زمانی فرونشست است، اما استفاده از این مشاهدات با محدودیت‌های اندازه‌گیری فرونشست به‌صورت نقطه‌ای و هزینه زیاد مواجه هستند. اگر محدوده مورد مطالعه خارج از محدوده ایستگاه ژئودتیک باشد، امکان بررسی این پدیده با استفاده از مشاهدات GPS وجود ندارد [7]. در تصویر ۱-۵ پراکندگی ایستگاه‌های GPS کشور نشان داده شده است.



شکل ۱-۵. پراکندگی ایستگاه‌های شبکه ژئودینامیک کشور [44]

۱-۲-۵-۳- روش تداخل سنجی راداری

در دو دهه اخیر تکنیک‌های تداخل سنجی راداری به‌عنوان ابزاری کارآمد و توانمند در مطالعه پدیده‌هایی که موجب تغییر شکل سطح زمین می‌شوند مطرح‌شده و در موارد بسیاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند که موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه و افزایش دقت و سرعت می‌شود [4]. تداخل سنجی راداری با تفاضل فازهای دو تصویر گرفته‌شده از یک صحنه ارتفاع منطقه را استخراج می‌کند و به‌این‌ترتیب مدل رقومی زمین را با دقت قابل قبولی به دست می‌آورد. این تفاضل فازهای حاصل که نوع جدیدی از تصویر است را تداخل نگار می‌نامند [29]. این روش با استفاده از حداقل سه تصویر که شامل تصویر اصلی^۱، پیرو^۲ و یک نقشه رقومی می‌باشد قابل اجرا است. با تعداد بیشتری از تصاویر می‌توان تغییرات سطحی رخ داده در سطح زمین را در بازه‌های زمانی متفاوت مورد مطالعه قرار داد. دقت این روش تابع طول موج داده‌های مورد استفاده است [7].

استفاده زمینی از یک سیستم رادار با SAR در تداخل سنجی برای ایجاد منحنی‌های میزان ارتفاعی،

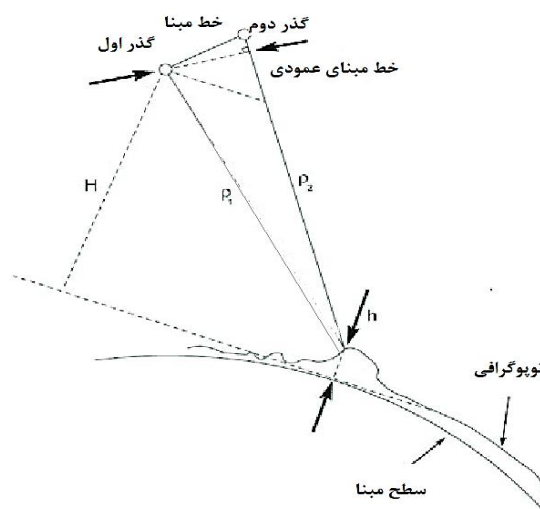
^۱ Master

^۲ Slave

اولین بار در سال ۱۹۷۴ استفاده شد و در سال‌های بعد گسترش داده شد [29].

تداخل سنجی راداری هنگامی امکان‌پذیر است که سطح زمین در فاصله بین دو عبور ماهواره تغییرات زیادی رخ نداده باشد، یعنی دو تصویر ماهواره باید همگن باشند. اشیاء ساخت بشر مانند ساختمان‌ها یا صخره‌های بزرگ در طولانی‌مدت در تصاویر از همگنی بالایی برخوردار هستند، درحالی‌که مناطق جنگلی حتی اگر تصاویر مربوط به دو روز متوالی هم باشند ممکن است ناهمگن باشند. تغییر شرایط اتمسفری و بخار آب موجود در هوا نیز باعث تغییر فاز و ایجاد نویز در تصاویر مربوطه می‌شود.

پس از پرتاب ماهواره ERS در سال ۱۹۹۱ اولین داده‌های تداخل سنجی راداری در دسترس محققین قرار گرفت. مطالعات تداخل سنجی با پرتاب ماهواره‌های ERS1 و ERS2 توسعه یافت. پس‌از آن، محققین زیادی به بررسی جنبه‌های مختلف تداخل سنجی راداری پرداختند.



شکل ۱-۶. خط مبنای مکانی در راستای دید سنجنده

به‌منظور بررسی تغییرات ارتفاعی یک سطح، تصاویر باید از یک مکان ولی در زمان‌های متفاوت اخذ شوند. به فاصله بین تصاویر خط مبنای، به فاصله زمانی بین تصاویر خط مبنای زمانی و به فاصله مکانی بین تصاویر، خط مبنای مکانی [7] گفته می‌شود. به توصیه آژانس فضایی اروپا به‌منظور حصول بهترین نتیجه، خط مبنای خط مبنای مکانی تصاویر کمتر از ۵۰ متر باشد. خط مبنای مکانی در شکل ۱-۶

قابل مشاهده است.

اصول ریاضی در تداخل سنجی راداری به این صورت است که تصاویر SAR شامل دو بخش حقیقی و مختلط هستند که این بخش‌ها در فرمول ۵-۱ نشان داده شده‌اند.

$$Y = |a| e^{i\varphi} \quad (5-1)$$

در این رابطه، $|a|$ ، φ و i به ترتیب دامنه، فاز و واحد موهومی عدد مختلط می‌باشند. محاسبه فاز تداخل سنجی $y_m y_s$ ، m نماینده تصویر اصلی و s نماینده تصویر فرعی)، از ضرب مختلط تصویر اصلی با مزدوج مختلط تصویر فرعی در فرمول ۶-۱ ذکر شده است.

$$y_m y_s = |a_m| e^{i\varphi_m} |a_s| e^{i\varphi_s} = |a_m| |a_s| e^{i(\varphi_m - \varphi_s)} \quad (6-1)$$

اختلاف فاز دو تصویر SAR به دست آمده محاسبه می‌شود و در نتیجه تداخل نگار تولید می‌شود. مؤلفه‌های اصلی سهم در فاز تداخل نگار تولیدی در فرمول ۷-۱ قابل مشاهده می‌باشند.

$$\varphi_{int} = \varphi_m - \varphi_s = \varphi_{def} + \varphi_{topo} + \varphi_{flat} + \varepsilon_{error} \quad (7-1)$$

در معادله ۳-۴، مؤلفه فازی φ_{def} تغییر شکل‌های سطحی زمین به علت پروسه‌های طبیعی یا فعالیت‌های انسانی، مؤلفه φ_{topo} ، فاز تداخل سنجی در ارتباط با توپوگرافی، φ_{flat} فاز ناشی از مسطح بودن زمین و ε_{error} مؤلفه‌های فازی مزاحم در تداخل نگار می‌باشند [45].

از معایب تکنیک تداخل سنجی راداری این است که توزیع مناسب زمانی برای این تصاویر وجود ندارد و در برآورد کردن صحیح نرخ جابه‌جایی کمی محدود می‌باشند. عدم همبستگی زمانی مربوط به تغییر سریع در شکل ظاهری و ویژگی‌های پراکنشی سطح زمین در بازه زمانی بین دو تصویر پایه و پیرو و عدم همبستگی هندسی ناشی از بزرگ بودن طول مبنای مکانی بین این دو تصویر است [46].

در دو دهه گذشته تداخل سنجی تفاضلی راداری پیشرفت قابل توجهی داشته است، این مسئله به چند علت می‌باشد [47]. اولین علت مهم آن در دسترس بودن داده‌های SAR است. توسعه روش تداخل سنجی تفاضلی در دهه اول با استفاده از داده‌های باند C بود. با ظهور داده‌های باند X از TerraSAR-

X و COSMO-SkyMed گام بزرگی در راستای پیشرفت روش‌های تداخل سنجی راداری برداشته شد. مهم‌ترین پیشرفت دیگر پرتاب دو ماهواره Sentinel-1 مجهز به سنسورهای باند C بود که از لحاظ پوشش منطقه، بازه زمانی مناسب تصویربرداری و توان عملیاتی بالا، دسترسی به داده‌های موجود را بهبود بخشیده و پتانسیل نظارت بر تغییر شکل توسط تداخل سنجی تفاضلی راداری را افزایش داده است [48]. دومین عامل پیشرفت قابل توجه تکنیک‌های تداخل سنجی تفاضلی آن است که به مرور زمان توسط افراد مختلف ارائه شده و از لحاظ کیفیت و اعتبار نتایج آن را بهبود بخشیده است. عامل سوم افزایش توان محاسباتی تداخل سنجی تفاضلی است. گروه‌های تحقیقاتی زیادی در زمینه بهره‌برداری از منابع محاسباتی پیشرفته مانند محاسبات موازی و ماشین‌های مجازی کار کرده‌اند [47].

۱-۲-۵-۴- روش‌های سنجش از دوری تداخل سنجی راداری

تکنیک‌های تداخل سنجی راداری قادر هستند تا جابه‌جایی سطح زمین را با دقت ارتفاعی سانتی‌متر و قدرت تفکیک مکانی چند ده متر اندازه‌گیری کنند [49] و تا به امروز برای اندازه‌گیری توپوگرافی و تغییرات سطح زمین، مانند تغییر شکل در برابر زلزله [50]، تغییر شکل تکتونیکی-آتشفشانی [51]، حرکت یخچال‌ها [45]، زمین‌لغزش [52]، افت مناطق آبرفتی [53] و فرونشست [39] استفاده شده‌اند. در روش تداخل سنجی تفاضلی راداری^۱ از اطلاعات کسب‌شده از فاز راداری حداقل دو تصویر که در زمان‌های مختلف از یک منطقه تهیه شده‌اند برای تهیه یک جفت تداخل نگار^۲ بهره‌گیری می‌شود [54]. با محاسبه اختلاف فاز بین دو تصویر، تداخل نگار ایجاد می‌شود. پس از تولید تداخل نگار و تصحیح خطاهای موجود در تداخل سنجی، مجموعه‌ای از تداخل نگارها در بازه‌های زمانی مختلف بر روی منطقه مورد مطالعه تشکیل می‌شود [4].

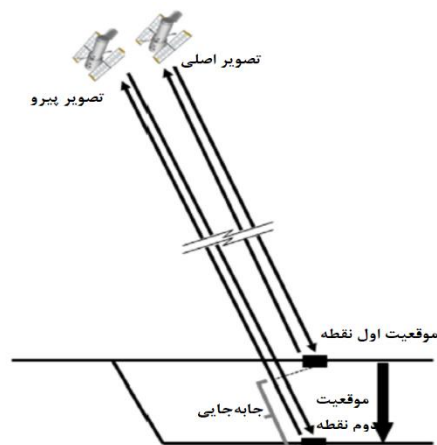
^۱ Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar

^۲ Interferogram

منبع داده‌های سنجش‌ازدور تابش الکترومغناطیسی است که از شیء یا پدیده بازتاب می‌شود. به وسیله‌ای که تابش منعکس‌شده از شیء یا پدیده را آشکارسازی می‌کند سنجنده می‌گویند [55]. پوشش سرتاسری و رزولوشن خوب تصاویر راداری و دقت قابل‌قبول روش تداخل سنجی راداری، این تکنیک را به‌عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون زلزله، فرونشست، زمین‌لغزش و ... مطرح کرده است [29]. GPS و روش ترازیابی دقیق برای اندازه‌گیری جابه‌جایی کلی زمین و اکستنسومترها برای اندازه‌گیری جابه‌جایی در زیر سطح زمین منطقه محدودی را با هزینه بالا پایش می‌کنند. روش‌های تداخل سنجی راداری تفاضلی می‌توانند مناطق بزرگ‌تر شهری را برای پایش با هزینه مناسب‌تر مورد پوشش قرار دهند [13] و در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های غیر ژئودتیک با توجه به مزایایی که نسبت به دیگر روش‌ها دارد، به‌عنوان کارآمدترین روش با دقت پایش بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [56]. پردازش تداخل سنجی تفاضلی راداری امکان اندازه‌گیری تغییرات زمانی جابه‌جایی سطح زمین را با استفاده از تصاویر SAR بر سرزمین‌های بزرگ را سهولت می‌بخشد.

۱-۲-۵-۵- تداخل سنجی تفاضلی راداری

هدف این تکنیک، جداسازی سهم فاز توپوگرافی سطح زمین و سهم فاز جابه‌جایی آن برای نشان دادن میزان جابه‌جایی آن است. برای حذف سهم فاز توپوگرافی به یک تداخل نگار دیگر و یا دسترسی به مدل ارتفاعی رقومی زمین نیاز است. با این تکنیک به صحت در حد میلی‌متر یا سانتی‌متر برای سرعت تغییر شکل زمین می‌توان دستیافت [29]. به دلیل دقت خوب روش تداخل سنجی راداری می‌توان از تداخل سنجی راداری تفاضلی برای اندازه‌گیری دقیق پدیده‌های ژئوفیزیکی، زمین‌لرزه و آتش‌فشان استفاده کرد [57]. تداخل سنجی تفاضلی مقدار جابه‌جایی را با استفاده از دو تصویر اصلی و پیرو و اختلاف فاز آن دو محاسبه می‌کند (شکل ۱-۷).

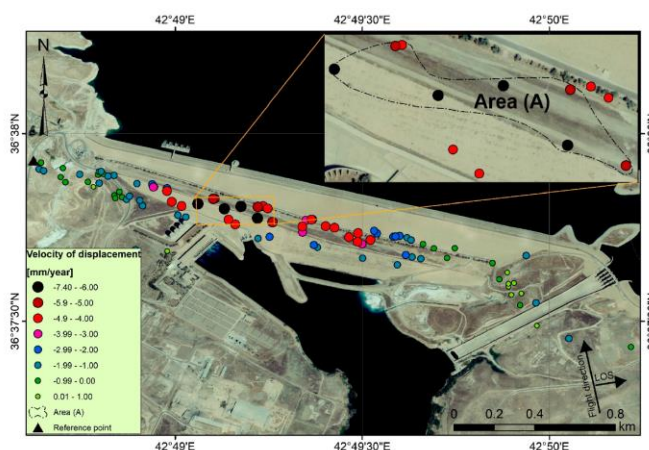


شکل ۱-۷. اصول تداخل سنجی تفاضلی راداری [9]

۱-۲-۵-۶- تداخل سنجی تفاضلی بر پایه پراکنش گرهای دائمی

استفاده از عوارض و پراکنش گرهایی مانند دست سازه‌های انسانی و عوارضی مانند کوه و بیابان که در طول زمان دارای رفتار پراکنشی ثابت هستند را تداخل سنجی بر پایه پراکنش گرهای دائمی می‌نامند [58]. نتایج اصلی تجزیه و تحلیل PSI عبارت‌اند از سری زمانی تغییر شکل و سرعت انجام تغییر شکل بر اساس پراکنده سازه‌های تحلیل شده. استفاده از تکنیک PSInSAR محدود به فرونشست نبوده و برای برخی مسائل دیگر به‌طور مثال پایش زمین لغزش به کار گرفته شده است [59].

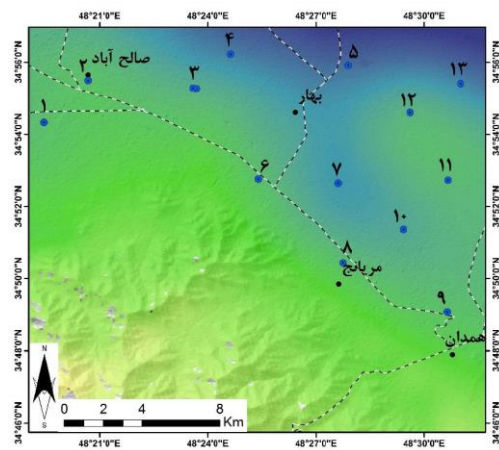
در شکل ۸-۱ نمونه‌ای از داده‌های خروجی با استفاده از روش PSI آورده شده است.



شکل ۸-۱. نقشه حاصل از اندازه‌گیری‌های PSI [60]

۱-۲-۵-۷- تداخل سنجی تفاضلی بر پایه خط مبنای کوتاه

در این روش تنها زوج تصویرهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنای باشد، همچنین خط مبنای زمانی آن‌ها نیز هم‌زمان کمینه باشد. پس از تشکیل تداخل نگارها، شبکه‌ای از تصاویر ایجاد می‌شود که با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود [4]. این روش در کنار مزایایی که در بخش قبل گفته شد معایبی نیز دارد. روش SBAS نیاز به افزایش نمونه‌گیری فضایی و زمانی نسبت به روش PSI دارد. این روش، با چند تصویری کار می‌کند و برای تشخیص تغییر شکل محلی مناسب نیست. یک نمونه از خروجی‌های این روش در شکل ۹-۱ مشاهده می‌گردد.



شکل ۹-۱. نتایج روش SBAS به منظور پایش فرونشست [61]

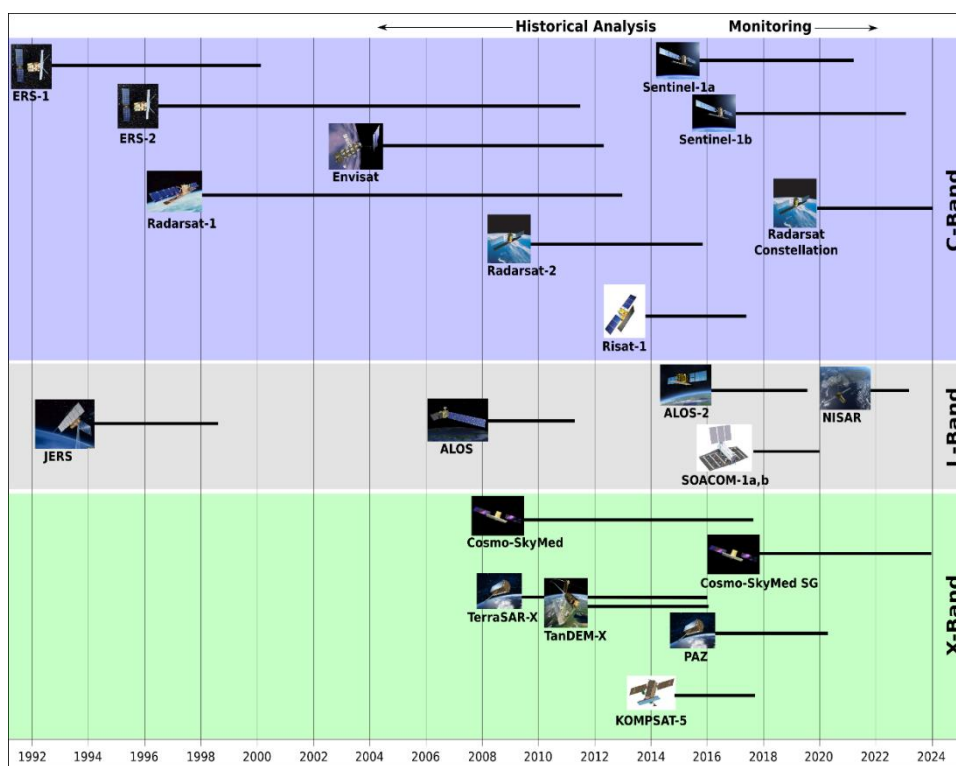
۱-۲-۶- داده‌های ماهواره راداری

داده‌های چند طیفی اطلاعات غنی طیفی را از عوارض مختلف به ما می‌دهند، اما تحت تأثیر عوامل محیطی مانند دود، مه، ابر و میزان نور خورشید قرار می‌گیرد. برخلاف سنجنده‌های اپتیک، سنجنده‌های SAR در همه نوع شرایط آب و هوایی و در تمام ساعات شبانه‌روز توانایی اخذ داده را دارند [62]. سیستم رادار از امواج الکترومغناطیس بهره‌گیری می‌کند که محدوده طول موج ۱ میلی‌متر تا طول موج ۱ متر را در برمی‌گیرند [63]. محدوده امواج این باندها در جدول ۱-۱ آورده شده است.

جدول ۱-۱. باندهای مورد استفاده در سنجنده‌های راداری [21]

SAR RADAR Band	Frequency Range (GHz)	Corresponding Wavelength Range(cm)
P	0.23-1	130-30
L	1-2	30-15
S	2-4	15-7.5
C	4-8	7.5-3.75
X	8-12.5	3.75-2.4
Ku	12.5-18	2.4-1.67
K	18-26.5	1.67-1.13
Ka	26.5-40	1.13-0.75

شکل ۱-۱۰ نشان‌دهنده محدوده امواج و بازه زمانی فعالیت سنجنده‌های SAR است.



شکل ۱-۱۰. سنجنده‌های راداری با دریچه مصنوعی [64]

داده‌های باند X نسبت به باند C و L حساسیت بیشتری به پوشش گیاهی و همبستگی زمانی دارد

[65]؛ اگرچه دقت این باند از سایر باندها بیشتر است [13]. نتایج مطالعات بر اساس پردازش‌های PSI

نشان داده است باند C در مناطق شهری عملکرد بهتری نسبت به باند L دارد [66].

۱-۲-۶-۱- داده‌های ماهواره راداری Sentinel-1

با توجه به اظهارات آژانس فضایی اروپا، ماهواره Sentinel-1 در آوریل ۲۰۱۴ از فرانسه پرتاب شد. این ماهواره، یک ابزار راداری پیشرفته برای تهیه تصاویر ماهواره‌ای عوارض و پدیده‌ها به صورت شبانه‌روزی بدون در نظر گرفتن شرایط آب‌وهوایی سطح زمین را با خود حمل می‌کند و هر ۶ روز یک‌بار از سطح زمین تصویربرداری می‌کند (شکل ۱-۱۱).

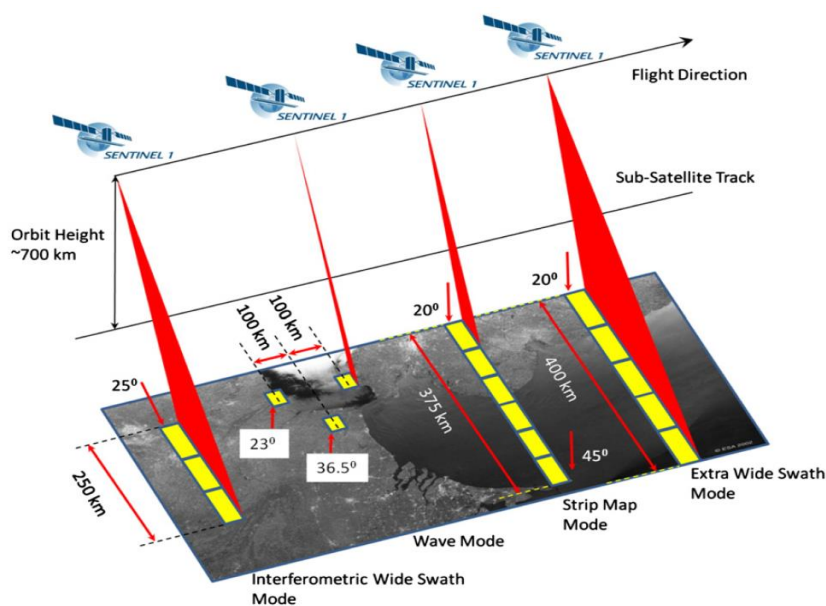


شکل ۱-۱۱. ماهواره Sentinel-1 [67]

ابزار Sentinel-1 SAR بازمان بازنگری کوتاه، داده‌ها را به‌طور منظم برای نظارت آبی و زمینی، پاسخ به شرایط اضطراری و تغییرات آب‌وهوایی ارائه می‌دهد.

پهنای نواری داده‌های تداخل سنجی، ۲۵۰ کیلومتر بوده و دامنه آن برای دقت فضایی و هماهنگ‌سازی پشت سر هم برای تداخل سنجی ۲۰×۵ متر (دامنه و آزیموت) است (شکل ۱-۱۲). قدرت تفکیک مکانی این ماهواره، ۸۰، ۲۵۰، ۴۰۰، ۲۵ و ۱۰۰ است.

قابلیت قطبش دوگانه این ماهواره باعث تحویل سریع داده‌ها از ماهواره به ایستگاه‌های زمینی شده است. این ماهواره از یک رادار با روزنه مجازی برخوردار است که تصاویری با قدرت تفکیک بالا را ارائه می‌دهد. جدول ۱-۲ ویژگی‌های حالت تصویربرداری IW که در این مطالعه از تصاویر این حالت بهره‌گیری شده است را بیان می‌کند.



شکل ۱-۱۲. حالت‌های عملیاتی ماهواره Sentinel-1 [67]

جدول ۱-۲. ویژگی‌های اصلی حالت تصویربرداری IW شریفی

ویژگی	مقدار
عرض نوار	۲۵۰ کیلومتر
گستره زاویه برخورد	۲۹٫۱ تا ۴۶ درجه
تعداد زیر نوار	۳
زاویه هدایت سمت	±۰٫۶ درجه
تعداد مشاهده سمت و برد	تک
گزینه‌های قطبش	HH+HV, VV+VH, HH, VV
حداکثر نویز معادل سیگما صفر (NESZ)	-۲۲ db
پایداری رادیومتریکی	۰٫۵db
دقت رادیومتریکی	۱ db
خطای فاز	۵ درجه

۱-۳- بیان موضوع

پدیده فرونشست به آهستگی و به تدریج گسترش می‌یابد ولی خطرات ناشی از آن مانند سیل و زلزله به یکباره آشکار نمی‌شود، لذا آثار و تبعات مخرب آن به تدریج ظاهر شده و ابعاد مختلفی را دربر می‌گیرد [34]. همان‌طور که در سال‌های اخیر در کشور ایران به علت برداشت بی‌رویه از آب‌های

زیرزمینی، خشک‌سالی و عوامل دیگر این پدیده آشکار شده و آسیب‌های جدی به زمین‌های کشاورزی و دیگر سازندها وارد آورده و باعث بروز خسارت‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی فراوانی [69] همچون، خرابی سازه‌های مهندسی، ایجاد شکاف در سطح زمین و لوله زایی چاه‌ها می‌شود [70].

به‌واسطه بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و قابلیت تکرارپذیری آن، پایش این پدیده با سهولت و در کوتاه‌ترین زمان و بهینه‌ترین هزینه اجرایی قابلیت اجرا دارد، این روش بررسی میزان و دامنه فرونشست را در محدوده موردبررسی را امکان‌پذیر کرده و امکان پایش آن را برای تمام نقاط در دوره‌های زمانی مختلف فراهم آورده است [5]. با مقایسه سری زمانی فرونشست و افت سطح تراز پیزومتری چاه‌ها می‌توان ارتباط مستقیم آن‌ها را به دست آورد [18]. برای بررسی چگونگی رفتار آبخوان در طول بازه موردبررسی، رابطه بین تغییر شکل زمین و تکامل سطح آب زیرزمینی در چند چاه موردبررسی قرار می‌گیرد و بسته به رفتار زمین در برابر فرونشست می‌توان تصمیم‌های مختلف مدیریتی را در مورد منابع آب اتخاذ کرد. با توجه به اهمیت دشت سملقان در استان خراسان شمالی و وقوع پدیده فرونشست در آن، مطالعه فرونشست در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است.

۱-۴- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

بنا به گزارش شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان شمالی، در سال‌های اخیر میزان بارش استان خراسان شمالی ۲۳٪ کاهش داشته و ۹۸٪ استان درگیر خشک‌سالی است. دشت سملقان به لحاظ منابع آبی، جزو دشت‌های بسیار حساس و آب‌های سطحی آن جزو دشت‌های نیمه حساس به شمار می‌رود. دشت سملقان دچار بیلان منفی آب بوده و فرونشست‌های متعددی در آن دیده شده است [71]. این فرونشست‌ها موجب ایجاد خسارات زیادی در دشت شده‌اند؛ بنابراین ارزیابی، پایش و مدل‌سازی عوامل مؤثر در فرونشست از اهمیت بالایی برای برنامه‌ریزی مهار آن برخوردار است که در این راستا داده‌های سری زمانی ماهواره‌ای و تکنیک‌های اندازه‌گیری فرونشست زمین با روش تداخل سنجی راداری می‌تواند

مؤثر واقع شود. این پژوهش بر آن است تا از طریق پردازش داده‌های ماهواره‌های راداری و ارتباط سنجی تغییرات زمین و آبخوان در دشت سملقان راهکارهای اجرایی مناسبی را جهت بازگشت‌پذیری یا کنترل فرایند فرونشست پیشنهاد نماید.

۱-۵- اهداف و سؤالات تحقیق

مطالعه فرونشست عموماً در دشت‌های بحرانی کشور انجام‌شده و فراگیر نبوده است. با توجه به وقوع پدیده فرونشست در دشت سملقان و اهمیت این دشت در استان، در این مطالعه سعی شده است با بررسی میزان برداشت از چاه‌ها، پردازش داده‌های ماهواره‌ای راداری با استفاده از تکنیک تداخل سنجی و همچنین داده‌های لندست به‌منظور بررسی تغییرات پوشش اراضی، بررسی داده‌های زمین‌شناسی و بررسی نمودارهای تنش-کرنش، میزان فرونشست را بررسی و تحلیل کند و درنهایت با شناسایی نقاط بحرانی و رفتار آبخوان، راهکارهای مفید به‌منظور کنترل، مدیریت و امکان برگشت‌پذیری این پدیده ارائه شود. سؤالات طرح‌شده در راستای انجام پژوهش و پاسخ‌های فرضی آن‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- سؤال: آیا تکنیک تداخل سنجی تفاضلی قادر است با استفاده از داده Sentinel-1 فرونشست

را با دقت مناسبی استخراج نماید؟

فرض: داده‌های ماهواره راداری Sentinel-1 قادر است با دقت مناسبی فرونشست دشت را اندازه‌گیری نماید.

- سؤال: حداکثر فرونشست سالیانه در دشت سملقان چقدر و ارتباط آن با افت آب‌های

زیرزمینی، پوشش گیاهی، تیپ اراضی، نوع ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک و رفتار خاک در این نواحی چگونه است؟

فرض: فرونشست در منطقه موردنظر نرخ افزایشی داشته است و با افت آب‌های زیرزمینی ارتباط مستقیم دارد، هرچه بافت خاک ریزدانه‌تر باشد فرونشست بیشتری اتفاق می‌افتد.

- سؤال: آیا شرایط زمین‌شناسی دشت امکان برگشت یا کنترل فرونشست را دارد؟
- فرض: وضعیت زمین‌شناسی دشت به دلیل وجود لایه‌های متراکم رسی اجازه برگشت‌پذیری را نمی‌دهد و فقط می‌توان از طریق مدیریت کنترل نمود.

۱-۶- فصل‌بندی پایان‌نامه

- این پایان‌نامه در ۵ فصل ارائه گردیده که در این بخش معرفی خواهند شد.
- در فصل اول **کلیات تحقیق** ارائه‌شده که در آن به تعاریف، بیان موضوع، اهمیت و ضرورت انجام تحقیق و در پایان اهداف و سؤالات تحقیق پرداخته‌شده است.
 - در فصل دوم **پیشینه تحقیق** و مروری بر ادبیات پایش فرونشست در منابع خارجی و داخلی بیان‌شده و درنهایت با جمع‌بندی آن‌ها به نقاط قوت پژوهش حاضر پرداخته خواهد شد.
 - فصل سوم شامل **مواد و روش‌ها** بوده که در آن روش انجام تحقیق، منطقه مورد مطالعه، ابزارها و داده‌های مورد استفاده در تحقیق معرفی و فلوچارت انجام تحقیق ارائه‌شده است.
 - فصل چهارم **بیان نتایج تحقیق** بوده که شامل پیاده‌سازی و بررسی و بحث بر روی نتایج حاصل از روش انتخابی است.
 - در فصل پنجم به‌طور خلاصه به **جمع‌بندی نتایج و پیشنهادها** و همچنین محدودیت‌های پیش‌آمده برای انجام پژوهش پرداخته‌شده است.

فصل ۲: پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

از گذشته تاکنون از راه‌های زیادی به منظور تشخیص و کنترل مناطق فرونشست استفاده شده است. امروزه از روش‌هایی همچون تداخل سنجی راداری، GPS، ترازیبی دقیق [6]، روش‌های عددی [72]، الگوریتم ژنتیک [32] و ... منظور اندازه‌گیری و یا پیش‌بینی این پدیده استفاده می‌شود.

برای اندازه‌گیری میزان تراکم و انبساط رخ داده در آبخوان می‌توان از دستگاهی به نام کشش سنج استفاده کرد، این دستگاه جابه‌جایی یک‌بعدی زمین را در یک عمق خاص محاسبه می‌نماید. در میان روش‌های نام‌برده دقیق‌ترین اندازه‌گیری‌ها به کمک روش ترازیبی دقیق و کشش سنج صورت می‌گیرد [73]. ترازیبی ارتفاعی و GPS جابجایی سطح زمین را اندازه‌گیری می‌کنند. درحالی که چاله‌های کشش سنج تغییرات لایه‌های زیرین سطح زمین را بررسی می‌کنند. این روش‌ها به علت هزینه بالا قادر به پایش نقاط محدودی می‌باشند. به منظور آمایش مناطق بزرگ‌تر شهری، تکنیک‌های تداخل سنجی تفاضلی با هزینه معقول‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرند [56].

در این فصل تعدادی از تحقیقات انجام‌شده بر فرونشست مناطق مختلف با ذکر نتیجه مطالعات و روش انجام تحقیق آن‌ها به صورت مختصر بیان شده است.

۲-۲- پایش فرونشست در جهان

از حدود سال ۱۹۶۵، سازمان یونسکو اولین برنامه جهانی خود را برای چرخه‌های آبی با موضوع دهه جهانی آب‌شناسی آغاز کرد که در نتیجه آن در سال‌های بعد، فرونشست به یکی از موضوعات اصلی این برنامه تبدیل گردید. در آوریل ۱۹۷۵ گروه کاری فرونشست در پاریس شکل گرفت که اساس کار این گروه، بررسی ارتباط این پدیده با آب‌های زیرزمینی بود. پس از آن در کشورهای مختلف به‌ویژه ژاپن و ایالات متحده بررسی‌های بیشتری انجام گرفت که منجر به تغییر الگوی مصرف و کنترل شدید آن گشت و این مسئله موجب توقف فرونشست در بسیاری از موارد مشاهده شده بود [6].

تیتینی و همکاران، ۲۰۱۱؛ تزریق مایعات به زیرزمین در مناطق مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند. از سده ۱۹۰۰ در جنوب ایالت کالیفرنیا برداشت از ذخایر آب زیرزمینی به منظور مصارف کشاورزی شدت گرفت. کاهش بارش هم‌زمان با افزایش مصرف آب در قرن ۲۰ میلادی باعث افت هد در لایه آرتزین به میزان ۸۰ متر شد. افت سطح آب در این منطقه باعث فرونشست ۴ متری زمین شده است. بررسی‌های صورت گرفته با تداخل سنجی راداری نمایانگر آن است که از سال ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۹ به علت تغذیه آبخوان، زمین در مناطقی دچار بالآمدگی شده است [40].

لینلین و همکاران، ۲۰۱۴؛ فرونشست زمین در آبخوان بندانگ اندونزی را از طریق پایش به روش‌های InSAR و GPS، ۲۴ سانتی‌متر گزارش کرده‌اند. علت این فرونشست استخراج آب زیرزمینی به منظور مصارف صنعتی و کشاورزی و همچنین استخراج گاز عنوان شده است. در این منطقه هر ۲ سانتی‌متر نشست زمین به علت ۱ متر افت سطح آب زیرزمینی است. بیشتر محدوده‌های نشست زمین در اطراف مراکز صنعتی بوده‌اند [74].

از کوئزو و همکاران، ۲۰۱۴؛ یکی از آبخوان‌های مرکزی اسپانیا را با استفاده از روش PSI در یک بازه ۸ ساله مورد مطالعه قرار دادند که رفتار آبخوان مورد نظر، نیمه الاستیک تشخیص داده شد. میزان بیشینه فرونشست در این منطقه حدود ۸ سانتی‌متر گزارش شد. به طور متوسط رفتار الاستیک آبخوان ۴ برابر بیش از رفتار غیر الاستیک آن شناسایی شده است. همچنین حلقه‌های تنش-کرنش رسم شده نمایانگر پاسخ الاستیک زمین بر تغییرات آن بوده است [75].

دکلرک و همکاران، ۲۰۱۷؛ فرونشست آبخوان کامبرو-سیلوریان بلژیک را مورد بررسی قرار دادند. این ناحیه طی گذر زمان با افزایش سطح پیرومتریک، بازیابی شده و زمین دچار بالآمدگی گشته است. بررسی روند تغییرات سطح آب با استفاده از داده‌های پیرومتری نشان داده است که شارژ مجدد آبخوان باعث افزایش ارتفاع سطح سالانه ۳ میلی‌متری شده که این موضوع باعث بالا آمدن سطح زمین شده است. بررسی‌ها با تداخل سنجی راداری نشان‌دهنده نشست تنها در نزدیک منطقه‌ای صنعتی بوده

است [39].

پیزارو و همکاران، ۲۰۱۷؛ مطالعه‌ای بر آبخوان مادرید در اسپانیای مرکزی باهدف نقشه‌برداری آب‌های زیرزمینی به‌وسیله تکنیک PSI انجام دادند که درنتیجه این پژوهش رفتار آبخوان نیز موردبررسی قرار گرفت. نقشه‌های سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریجینگ درون‌یابی شدند. سپس نمودارهای تنش-کرنش رسم و رفتار خاک با بررسی‌های انجام‌شده برگشت‌پذیر تشخیص داده شد [18].

گائو و همکاران، ۲۰۱۸؛ فرونشست بجینگ چین را با استفاده از روش تداخل‌سنجی مورد مطالعه قرار داده‌اند. برداشت طولانی‌مدت آب با حجم بالا موجب افت سطح آب و آسیب به ۸۷٪ از منطقه و نشست شهر شده است. پژوهشگران، این منطقه را توسط دو سری داده‌های SAR و داده‌های چاه‌های مشاهداتی مورد مطالعه قراردادند و سپس تلاش کردند تا رابطه‌ای میان داده‌های مشاهداتی و نتایج حاصل از تداخل‌سنجی برقرار کنند. بر اساس مطالعات انجام‌شده، در نواحی شمالی منطقه مورد مطالعه، در اثر استخراج افت هد هیدرولیکی، تراکم غیرقابل‌بازگشت مشاهده‌شده است. چاه‌های مشاهداتی منطقه نشان داده‌اند که در مناطق فاقد فرونشست رفتاری قابل‌برگشت فصلی مشاهده‌شده که در اثر تغییرات آب سطحی اتفاق افتاده است [20].

ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ مطالعه‌ای با استفاده از اعمال روش SBAS بر داده‌های RADARSAT2 برای سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۸ بر روی ووهان چین انجام دادند که نتایج نشان‌دهنده ۴ منطقه عمده فرونشست با بازه ۵۱٫۵۶- تا ۲۷٫۸ میلی‌متر بر سال به علت توسعه شهرنشینی، حفاری خط مترو و استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی بود. مقایسه نتایج با ترازیابی دقیق نشان‌دهنده تفاوت کمتر از ۵ میلی‌متر بر سال است که نشان از دقت روش انتخابی بر روی منطقه مورد مطالعه دارد. مطالعات نشان داده عوامل طبیعی سنگ‌های کربناته و وجود خاک نرم در منطقه زمینه‌ساز تشدید آثار انسانی بر وقوع پدیده فرونشست داشته‌اند [76].

فاورا و همکاران، ۲۰۱۹؛ روش DInSAR و PSI را با استفاده داده‌های Sentinel-1 در منطقه‌ای کوچک مقایسه نمودند. نتایج با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری ژئودتیک، انحراف سنج^۱ و اسکن با لیزر صحت سنجی شدند. هر دو روش DInSAR و PSI نتایج قابل قبولی را نشان دادند. نتایج PSI در بررسی‌های درجا عملکرد مناسبی داشته است [77].

بران و همکاران، ۲۰۲۰؛ فرونشست شهر هو^۲ ویتنام را با ۵۳ تصویر Sentinel-1 با استفاده از روش PSI در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ مورد مطالعه قرار داده و ارتباط این نشست را با نوع خاک منطقه بررسی کردند. میزان جابه‌جایی کلی ۲۵- و ۱۰+ در سال اندازه‌گیری شده، سپس توزیع مکانی آن با نوع خاک منطقه مقایسه شد [78].

پائولوسزک فیلیپک و بورکوسکی، ۲۰۲۰؛ برای پایش فرونشست معدن ریدالتووی^۳ لهستان، به علت استخراج زغال‌سنگ از روش DInSAR و PSI استفاده نموده و نتایج را باهم مقایسه کرده‌اند. به علت عدم همبستگی زمانی، PSI منطقه کمتری را پوشش داده است، همچنین این روش در تخمین جابه‌جایی‌های بالاتر از ۱۲ سانتی‌متر موفقیت‌آمیز عمل نکرده است، درحالی‌که DInSAR قادر به اندازه‌گیری فرونشست با بزرگی ۸۶ سانتی‌متر در سال بوده است [79].

میلر و همکاران، ۲۰۲۰؛ فرونشست دره مرکزی کالیفرنیا را که دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک مستعد خشک‌سالی است با استفاده از داده‌های UAVSAR، کشش سنج، داده‌های تراز آب زیرزمینی، ترازابی دقیق، تصاویر Sentinel-1، لاگ چاه‌ها و شرایط محیطی مورد مطالعه قرار دادند. به منظور انجام این مطالعه ۳۱ تصویر باند L ماهواره UAVSAR با روش InSAR پایش کردید، سپس داده‌های Sentinel-1 با روش SBAS پردازش شدند. در این مطالعه در بخشی از منطقه فرونشست الاستیک تشخیص

^۱ Inclinator

^۲ Hue

^۳ Rydułtowy

داده شده است. فرونشست در این منطقه ۱۰ سانتی متر و بیشتر گزارش شده است [73].

سیگنا و همکاران، ۲۰۲۱؛ با استفاده از ۳۰۰ تصویر Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۲۰ - ۲۰۱۴ با تکیه بر روش SBAS InSAR، الگوی رفتاری مکانی مکزیکوسیتی را محاسبه نمودند. فرونشست زمین در مناطق مختلف آن از ۸/۸ تا ۳۸/۷ سانتی متر بر سال متغیر است. در این مطالعه بین جابجایی عمودی و رسوبات دریاچه‌ای رسی یک معادله به دست آمد. سری زمانی InSAR با GPS مقایسه شد و RMSE میان آن‌ها ۰/۹ به دست آمد. تخمین زده شده به علت تفاوت نشست زیرساخت‌های تأسیساتی و گسلش سطحی، در برخی مناطق ۲/۷ میلیون از سکنه تحت تأثیر سیل‌های فاجعه‌بار قرار خواهند گرفت [80].

۲-۳- سابقه پایش فرونشست در ایران

در ایران پدیده فرونشست به علت حاکم بودن شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی و تمرکز بهره‌برداری روزافزون بر منابع طبیعی، از سابقه‌ای به نسبت طولانی برخوردار است [81]. با افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی پدیده فرونشست زمین در مناطق مختلفی از ایران با درجات مختلف در گسترش است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، حدود ۳۰۰ دشت اصلی کشور با پدیده فرونشست مواجه می‌باشند [82]. مطالعه این پدیده به علت فراگیر شدن آن مورد توجه طیف وسیعی از محققان قرار گرفته است. پمپاژ بی‌رویه آب در کشور جهت کشاورزی و داده‌های موجود که افت سطح آب زیرزمینی را تأیید می‌کنند، موجب رخداد پدیده فرونشست در دشت‌های زیادی از نقاط خشک و نیمه‌خشک کشور شده و پیامدهای مشکل‌ساز حاصل از آن دور از انتظار نیست [29]. در ایران نشست منطقه‌ای زمین در اثر افت آب‌های زیرزمینی اولین بار در دشت رفسنجان گزارش شده، که میزان آن حدود ۱۰ درصد افت سطح آب زیرزمینی گزارش شده است. نخستین بررسی‌های علمی در ایران از حدود دو دهه قبل توسط توفیقی و همکارانش آغاز گردید. با فراگیر شدن این مسئله در سایر نواحی ایران مطالعات گسترده دیگری شکل گرفت.

یمانی و همکاران، ۱۳۸۸؛ ارتباط میان فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی با تکیه بر روش تحلیلی-توصیفی از طریق بررسی داده‌های هیدرو گراف واحد و تغییرات به وجود آمده در حجم ذخیره ۱۲ ساله مخازن دشت قره‌بلاغ در استان فارس را مورد بررسی قرار دادند. پس از ترسیم هیدروگراف واحد آبخوان، تغییرات حجم مخزن به صورت تجربی از طریق فرمول $V = H \times S \times A$ به دست آمده و سپس نتایج به صورت میدانی صحت سنجی شدند. بر اساس این مطالعه، نشست سالانه دشت قره‌بلاغ درازای هر ۲۶۰ سانتیمتر افت سطح آب‌های زیرزمینی به طور متوسط ۱۱,۸ سانتی متر تعیین شد [34]. شمشکی و همکاران، ۱۳۸۸؛ مطالعاتی به منظور شناسایی پهنه آبخوان و نقش آن در شکل‌گیری فرونشست زمین در دشت هشتگرد انجام دادند. زمین‌شناسی، هندسه و ویژگی‌های کمی آبخوان برای شناسایی آبخوان مورد استفاده قرار گرفتند. کاهش سطح پیزومتری در آبخوان تحت فشار جنوب منطقه موجب کاهش فشار رو به بالا و مخالف نیروی وزن لایه‌های رسوبی ریزدانه و افزایش تراز آب زیرزمینی در آبخوان آزاد بالایی موجب افزایش نیروی رو به پایین و در جهت نیروی وزن لایه‌های رسوبی ریزدانه شده که نتیجه آن تراکم این لایه‌ها و ایجاد فرونشست زمین با نرخ بیشینه ۱۶ سانتی متر بر سال شده است [83].

آمیغ پی و همکاران، ۱۳۸۹؛ فرونشست یزد با استفاده از ترکیب تداخل سنجی راداری و ترازایی دقیق را با نرخ بیشینه ۱۲ سانتی متر بر سال برآورد نموده‌اند. بررسی‌های صورت گرفته نشان داده است این نشست در اثر بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی که با بارندگی‌های منطقه جبران نمی‌شود صورت گرفته است. مقایسه دو روش تداخل سنجی راداری و ترازایی دقیق نشان‌دهنده تطابق خوبی میان این دو روش بوده است [6].

کرمی و همکاران، ۱۳۹۰؛ پیامدهای تأثیرات بی‌رویه افت آب‌های زیرزمینی را در دشت سملقان بررسی کردند. این محققان پس از بررسی تغییرات ۱۰ ساله تراز آب زیرزمینی، جهت حرکت و بیشترین افت آب را تعیین نمودند. میزان کسری مخزن این دشت برای ۱۸ سال ۲۱,۸۸ میلیون مترمکعب است.

شکاف‌های طولی کششی در امتداد تقریباً شمالی-جنوبی در شمال غرب دشت به دلیل افت سطح آب و زهکشی از لایه‌های ریزدانه هم‌راستای گسل منطقه ایجاد شده‌اند. نشست زمین در زمین‌های کشاورزی این منطقه به صورت شکاف قابل‌رؤیت هستند. همچنین در مناطقی نشست متجانس رخ داده که به صورت نشست فونداسیون پی‌زومترها قابل مشاهده است [84].

شریفی کیا، ۱۳۹۱؛ میزان و دامنه فرونشست در دشت نوق-بهرمان را به وسیله تکنیک DInSAR تعیین نمود. میزان فرونشست حدود ۳۰ سانتی‌متر در پهنه‌ای به گستره ۲۸ کیلومترمربع در بخش میانی دشت اندازه‌گیری شده است. در این دشت هر ۳٫۲ سانتی‌متر افت تراز آب قادر است فرونشستی به اندازه ۱ سانتی‌متر ایجاد کند. پس از تعیین میزان و دامنه فرونشست از طریق روش DInSAR داده‌های میدانی ثبت و پردازش شدند، داده‌ها صحت سنجی شده و در مرحله بعد علل فرونشست، با بررسی داده‌های زمین‌شناسی سطحی و زیرزمینی، کاربری اراضی و هیدروژئولوژی تبیین شدند [5].

میرشاهی و همکاران، ۱۳۹۲؛ با استفاده از داده‌های TerraSAR-X نرخ فرونشست جنوب غرب تهران را برای بازه‌ای ۱۱ ماهه و به کارگیری روش‌های PSI و SBAS حداکثر فرونشست حدود ۱۲ سانتی‌متر برآورد کردند. مقایسه نتایج حاصل از بهره‌گیری داده‌های TerraSAR-X با نتایج حاصل از مطالعات پیشین در همان منطقه نشان از دقت خوب و قابل قبول این ماهواره دارد [85].

دهقانی، ۱۳۹۴؛ بیشترین نرخ فرونشست را برای منطقه‌ای غیرشهری واقع در زیر حوضه مشهد ۲۳ سانتی‌متر بر سال برآورد نمود. تحلیل سری زمانی با استفاده از تکنیک SBAS انجام شده و رابطه تنش- کرنش با استفاده از اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی و اطلاعات سطح آب زیرزمینی در محل چاه‌های پی‌زومتری استخراج شده است. در این مطالعه، سری زمانی جابه‌جایی با سری زمانی سطح پی‌زومتری همبستگی بالایی نشان دادند [86].

رهنما و میراثی، ۱۳۹۵؛ در مرودشت بررسی‌هایی دادند که در آن پروفیل لایه‌بندی و سنگ کف، تغییرات سطح آب زیرزمینی (به صورت کانتورهای هم‌افت سطح آب زیرزمینی) و نمونه‌برداری و آزمایش

جهت تعیین پارامترهای موردنیاز برای انجام این مطالعه، از داده‌های موردبررسی در این مطالعه بودند. برای محاسبه نشست تحکیم از رابطه ترزاقی استفاده شد. به ازای هر ۲۹ متر افت آب در این دشت به‌طور متوسط ۱۶٫۵ سانتی‌متر نشست اتفاق افتاده که در بعضی مناطق به ۲۲ سانتی‌متر هم رسیده است [69].

صفاری و همکاران، ۱۳۹۵؛ نرخ متوسط سالانه فرونشست با بیشینه مقدار ۱۳٫۶ سانتی‌متر بر سال را در دشت کرج-شهریار گزارش نمودند. در این مطالعه استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی و افت سطح این آب‌ها، علت اصلی فرونشست فرض گردیده و از طریق دو مدل این افت آب اثبات شده است. به‌منظور پایش فرونشست در این مطالعه از روش SBAS استفاده گردیده است. از طریق قرار دادن لایه اطلاعاتی فرونشست بر روی عکس ماهواره‌ای گوگل ارث مشخص گردید که تعدادی از مراکز مسکونی و همچنین باغات و مزارع این محدوده و تمام سازه‌های مجاور با این مراکز در حداکثر خطر فرونشست قرار دارند [87].

ندیری و همکاران، ۱۳۹۵؛ با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان دشت شبستر ارائه دادند. فرونشست این دشت تا بیش از ۳۰ سانتی‌متر گزارش شده است. در پژوهشی که این محقق انجام داد هفت عامل هیدوروژئولوژیکی مؤثر بر فرونشست، شامل افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و فاصله از گسل مورد ارزیابی قرار گرفته و تلفیق شدند و نقشه آسیب‌پذیری در برابر فرونشست حاصل شد. نتایج حاصل از نقشه‌ها، با فرونشست به‌دست‌آمده از بررسی تصاویر ماهواره‌ای پردازش‌شده توسط روش InSAR صحت سنجی شدند و برای بهبود نتایج و بهینه‌سازی وزن‌هایی که به هریک از عوامل مؤثر بر فرونشست داده شده بود، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نقاط مستعد فرونشست دشت برای ارائه برنامه‌های مدیریتی لازم جهت جلوگیری از ایجاد و افزایش فرونشست مشخص شدند [32]. این محققان معتقد هستند که بسیاری از فرونشست‌های رخ داده در بسیاری از موارد قابل بازگشت نیستند و به همین دلیل

در مطالعات باید پتانسیل وقوع فرونشست در دشت‌ها انجام شود تا از قبل از رخداد این پدیده، از آن جلوگیری و مدیریت شود. البته که پیش‌بینی و جلوگیری از وقوع هر پدیده‌ای بسیار کم‌هزینه‌تر از رفع آن مشکل است، اما در نقاط زیادی از جهان فرونشست الاستیک اتفاق افتاده و این امر نشان‌دهنده آن است که پس از وقوع این پدیده نیز ممکن است بتوان از خسارات بعدی آن جلوگیری کرد و این مشکل را تا حدی برطرف کرد. چارچوب ارائه‌شده برای این مطالعه از عدم قطعیت بالایی برخوردار است، برای تعیین رابطه منطقی و صحیح بین پارامترهای فرونشست، پیشنهادشده که از روش‌های مختلف هوش مصنوعی بهره گرفته شود.

داوودی جم و کمال‌آبادی فراهانی، ۱۳۹۶؛ با استفاده از روش SBAS فرونشست دشت مهیار اصفهان را با استفاده از داده‌های Envisat در بازه ۲۰۱۰-۲۰۰۳ بررسی نمودند. به‌منظور انجام این مطالعه از ۱۰۸ تداخل نگار در دو سری بالا گذر و پایین گذر استفاده‌شده است. نتایج بازدیدهای میدانی و تداخل سنجی راداری در این منطقه همپوشانی خوبی نشان دادند [88].

جوان نیکخواه و همکاران، ۱۳۹۶؛ با استفاده از تکنیک SBAS فرونشست حدفاصل داراب و فسا را برای سال ۱۳۹۵ با استفاده از ۳۱ تداخل نگار برای منطقه فسا-نوبندگان و ۲۸ تداخل نگار برای منطقه داراب با استفاده از تصاویر Sentinel-1 اندازه‌گیری کردند. نتایج این مطالعه در منطقه فسا-نوبندگان سیگنال فرونشست را نشان نداده و در منطقه حسن‌آباد و داراب به ترتیب ۲٫۵ و ۲ سانتی‌متر در ماه برآورد شده است. نتایج حاصل از مطالعه، با انجام مشاهدات میدانی و بررسی هیدرو گراف واحد دشت موردبررسی قرار گرفته است [7].

احمدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ فرونشست دشت خرمدره را با استفاده از دو سری تصاویر ENVISAT و Sentinel-1 مورد مطالعه قرار دادند. آنالیز سری زمانی نشان‌دهنده تغییر شکل بیشینه ۳۵ میلی‌متر در سال برای داده‌های ENVISAT در سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۵ و بیشینه جابجایی ۴۱ میلی‌متر بر سال برای داده‌های Sentinel-1 در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۴ بوده است. به‌منظور صحت سنجی این نتایج از

روش ترازیابی دقیق و از ایستگاه ثابت GPS منطقه بهره‌گیری شده است. کاربری اراضی و چاه‌های منطقه نیز در سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد مطالعه قرار گرفتند و نتایج نشان‌دهنده بالا بودن تراکم اراضی کشاورزی و نیز چاه‌های بهره‌برداری در منطقه است. با توجه به عبور بزرگراه و خط ریل راه‌آهن از منطقه مورد مطالعه، توصیه‌شده کاربری اراضی در این منطقه مدیریت شود و بر استخراج از منابع آبی زیرزمینی نظارت کافی صورت گیرد [89].

خرمی و همکاران، ۲۰۱۸؛ نرخ فرونشست شهر مشهد را با PSI در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از ۶۹ تصویر بالا گذر و پایین گذر Sentinel-1 را تعیین نمودند. در این پژوهش بیشینه نرخ فرونشست در نواحی شمال غربی و شمالی شهر مشهد در حدود ۱۴ سانتی‌متر تعیین شده است. در این پژوهش داده‌های پی‌زومتری و اطلاعات پی‌زومتری نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند [90].

اکبری و همکاران، ۱۳۹۸؛ به منظور ارزیابی فرونشست زمین در دشت مشهد، از روش InSAR بهره‌گیری کرده و بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۷ را با استفاده از داده‌های ALOS و Sentinel-1 مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه نتایج با نقشه‌های افت آب زیرزمینی نشان‌دهنده همبستگی قابل قبول بود که نشان از تأثیرپذیری این پدیده از افت سطح آب داشت [63].

کرمی و محمدآبادی، ۱۳۹۸؛ به منظور مطالعه فرونشست در اصفهان از داده‌های ENVISAT و روش DInSAR برای بازه ۷ ساله استفاده کردند که پس از انتخاب ۴ جفت تصویر، کمترین و بیشترین مقادیر برآورد شده به ترتیب ۱۴ و ۱۹ سانتی‌متر بودند [91].

گلی مختاری و همکاران، ۱۳۹۸؛ عنوان نموده‌اند که در دشت‌های استان فارس، به دلیل برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، رشد جمعیت و عوامل دیگر خسارات زیادی به زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی در اثر فرونشست وارد شده است. به منظور پایش فرونشست در یکی از دشت‌های این استان، از داده‌های ماهواره Sentinel-1 و روش DInSAR برای بازه ۲۰۱۸-۲۰۱۵ استفاده شده است. همچنین روند تغییرات آب‌های زیرزمینی برای سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۸۲ با روش درونیابی IDW

مورد مطالعه قرار گرفته که در این بازه زمانی سطح آب زیرزمینی حدود ۲۲ متر افت داشته است. نقشه‌های حاصل از فرونشست حاکی از آن است که در دشت نورآباد سالانه به‌طور میانگین ۴ سانتی‌متر افت سطح آب رخ می‌دهد [92].

متعهد و همکاران؛ ۲۰۱۹؛ سابقه فرونشست زمین را در شهر مشهد با استفاده از روش ترازبایی دقیق بررسی نمودند. سپس از تداخل‌سنجی راداری به کمک ۲۳ تصویر ENVISAT استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده ورود دو کاسه فرونشستی از شمال غرب و جنوب شرق به حریم شهر مشهد بود. بررسی‌ها نشان‌دهنده آن بود که میزان فرونشست در مناطق با افت شدید سطح آب زیرزمینی، بافت خاک ریزدانه و ضخامت آبرفت زیاد، بیشتر است [93].

احمدی و سودمند افشار، ۱۳۹۹؛ با استفاده از تکنیک PSI بیشینه فرونشست دشت قروه و چهاردولی استان‌های همدان و کردستان را ۱۷۰ و ۱۶۶ میلی‌متر در بازه زمانی دوساله برآورد کردند. به‌منظور انجام مطالعه در مناطق موردنظر از ۵۹ تصویر بالا گذر و ۵۸ تصویر پایین گذر Sentinel-1 استفاده شده است. با توجه به داده‌های پیرومتری بررسی‌شده در مناطق مطالعاتی، یکی از علل عمده فرونشست در این مکان‌ها، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی عنوان شده است [94].

رضایی و موسوی، ۲۰۱۹؛ از تکنیک InSAR برای تجزیه و تحلیل تغییر شکل زمین در دشت گرگان، استفاده کردند. در این مطالعه از داده‌های فصلی هد هیدرولیکی و تجزیه و تحلیل تصاویر Sentinel-1 در مقیاس ماهانه از ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ استفاده شد؛ که جابه‌جایی عمودی الاستیک (به‌طور متوسط ۷۰ میلی‌متر در سال) و الاستیک فصلی (از حدود ۲۰ تا ۱۳۲ میلی‌متر) در سیستم آبخوان بسته گرگان را نشان می‌دهند. با داشتن ضریب همبستگی بالا بین مؤلفه‌های فصلی سری زمانی تغییر شکل هد و زمین، از یک تجزیه و تحلیل داده مشترک InSAR برای برآورد پارامترهای ذخیره‌سازی ویژه و تراکم‌پذیری در آبخوان الاستیک در مکان ۱۴ پیرومتر استفاده شده است. ضریب ذخیره ویژه آبخوان که از InSAR به‌دست آمده با خصوصیات هیدروژئولوژیک دشت گرگان ارتباط مستقیم داشت. مشاهده شده

است که هدهای بازسازی شده از InSAR و اندازه‌گیری آن‌ها در پی‌زومترها در بخش وسیعی از منطقه مطابقت دارد. جاهایی که فرونشست بیشتری داشته است درجه محصورشدگی آبخوان بیشتر بوده است [27].

۲-۴- جمع‌بندی

فرونشست پدیده‌ای است که در بسیاری از مناطق به علت شرایط حاکم بر اقلیم، رشد جمعیت و افزایش نیاز روزافزون به منابع مختلف زیرزمینی و سایر عوامل اتفاق افتاده و سبب بروز مشکلات زیادی شده و نیاز به مطالعه و پایش دارد. روش‌های مختلف زیادی برای شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست وجود دارند که مزایا و معایب مختلفی دارند. روش‌های مختلف سنجش‌ازدوری به نظر از بهترین روش‌ها برای اندازه‌گیری میزان فرونشست به نظر می‌آیند. توان تفکیکی مکانی و زمانی بالا، دقت بالا در کنار هزینه اندک تکنیک‌های راداری مانند DInSAR در مناطق شهری و این‌که روش‌هایی به‌منظور استفاده از همین تکنیک در مناطق غیرشهری و کوهستانی ارائه شده است، موجب شده که این تکنیک روشی مناسب و پرکاربرد برای شناسایی فرونشست باشد با توجه به مطالعات انجام‌شده در مناطق مختلف، تداخل سنجی تفاضلی روشی است که هم مناسب مناطق شهری بوده و هم مناسب مناطق غیرشهری است. به‌علاوه، استفاده از این تکنیک نیاز به پردازش‌های سنگین و پردازشگرهای قوی نداشته و با سرعت بیشتری پایش فرونشست با دقت قابل قبولی انجام خواهد گرفت. به همین دلیل در این مطالعه از این روش بهره‌گیری شده و ارتباط فرونشست به‌دست‌آمده با داده‌های چاه‌ها و تغییرات سطح آب زیرزمینی مقایسه خواهد شد. نمودارهای تنش-کرنش مربوطه را رسم کرده و درنهایت با توجه رفتار خاک طی زمان، پیشنهادهایی در مورد رفتار خاک و دستیابی به مدیریت پایدار آبخوان ارائه خواهد شد. دلیل انتخاب منطقه موردنظر این است که علاوه بر بحرانی بودن منطقه، تابه‌حال مطالعه‌ای به‌منظور اندازه‌گیری فرونشست این منطقه با استفاده از داده‌های رادار و ارتباط آن با افت آب‌های زیرزمینی

انجام نشده است. همچنین با توجه به رفتار آبخوان پیشنهادهایی به منظور کنترل فرونشست در راستای بهبود مدیریت منابع آب انجام خواهد گرفت، به همین دلیل انجام این پژوهش در منطقه مورد مطالعه جدید محسوب می شود. ضمناً بازه زمانی ۶ ساله مورد مطالعه، بازه‌ای نسبتاً طولانی به نسبت سایر مطالعات است. نرخ و میزان فرونشست به صورت مکانی-زمانی در منطقه مورد مطالعه و ارتباط آن با آب‌های زیرزمینی قرار گرفته که در کنار بررسی سایر شرایط آبخوان و ارائه راهکارهای مدیریتی از نقاط قوت مطالعه حاضر است.

فصل ۳: مواد و روش ها

۳-۱- مقدمه

در این فصل به بیان داده‌های مورد استفاده، روش تداخل سنجی راداری، معرفی منطقه مطالعاتی دشت سملقان و روش پیشنهادی انجام تحقیق و در نهایت فلوچارت انجام تحقیق پرداخته خواهد شد.

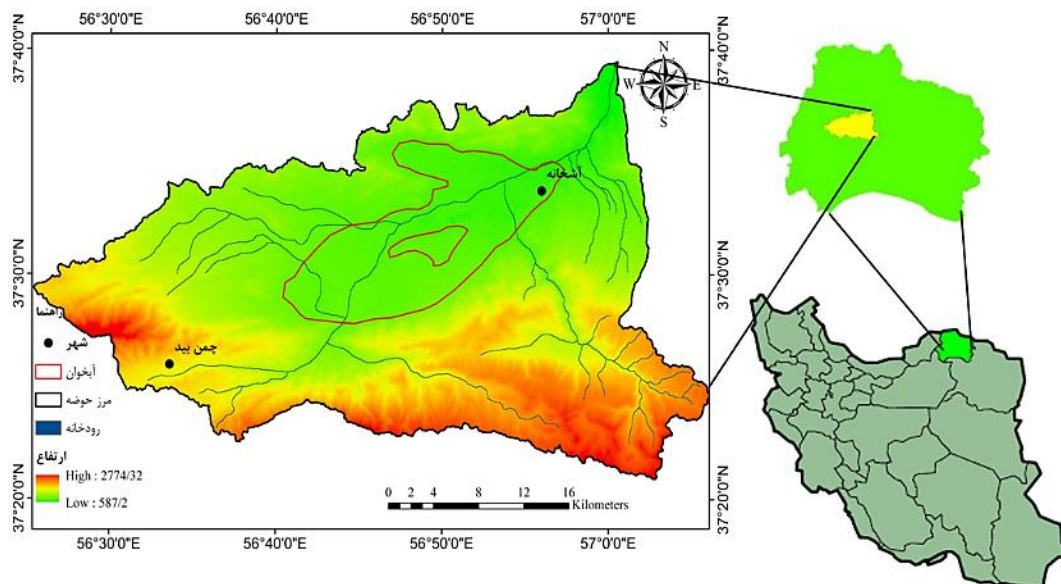
۳-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، دشت سملقان، در شمال غرب استان خراسان شمالی واقع شده است. در استان خراسان شمالی، تغییرات نسبتاً زیاد اقلیمی منطقه به سبب رشد شهرنشینی و تغییر سبک زندگی، استفاده روزافزون از خودروها و همچنین گرمایش روزافزون سطح زمین و در نتیجه افزایش دمای استان، رخ داده است. بارش‌ها در سطح استان حدود ۲۳٪ کاهش داشته است. این عوامل، یک پیامد مهم داشته و آن هم خشک‌سالی قریب به ۱۴ ساله در استان است. طبق آمار، میانگین دمای هوا بین سال‌های ۹۳-۹۴ بیش از ۱٫۵ درجه افزایش داشته و این موضوع باعث افزایش رشد تبخیر منابع آبی شده است. در ۳۵ سال گذشته، حدود ۷۵٪ آب‌های شیرین زیرزمینی مورد مصرف قرار گرفته‌اند [71]. در طرح تعادل بخشی آب در این استان، قرار است از اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی جلوگیری شود. همچنین اعطای مجوز به احداث چاه‌ها باید تعدیل شود و از روش‌های نوین آبیاری به منظور فراهم کردن شرایط تجدیدنظر در تخصیص‌ها و جایگزینی حمایت شود.

۳-۲-۱- موقعیت جغرافیایی

محدوده مورد بررسی فرونشست زمین، در نیمه غربی استان، شمال غرب بجنورد قرار داشته، یکی از زیر حوضه‌های حوضه آبریز رودخانه اترک و از توابع شهرستان آسخانه است. از سال ۱۳۷۹ به بعد در شمال غرب دشت سملقان شکاف‌هایی ایجاد شده که در حال توسعه هستند [95]، به همین علت این منطقه برای مطالعه انتخاب گردید. این محدوده با مساحتی برابر با ۱۱۴۸ کیلومترمربع، در حدفاصل ۵۶ درجه و ۱۱ دقیقه الی ۵۷ درجه و ۱۴ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه الی ۳۷ درجه و ۴۴ دقیقه

عرض شمالی و در منطقه‌ای نیمه‌خشک سرد قرار گرفته است. مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقاط از سطح دریا در این منطقه به ترتیب ۲۶۸۰ و ۶۰۰ متر می‌باشند.

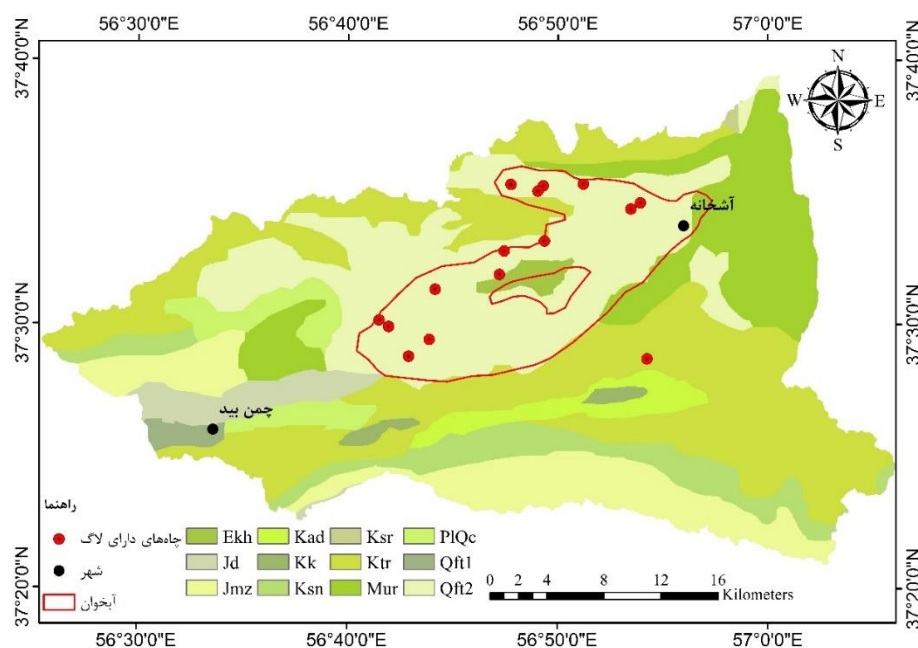


شکل ۳-۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

رودخانه اصلی این منطقه، رودخانه سملقان، از جنوب غرب دشت به سمت شمال شرق آن جریان دارد و رودخانه‌های شیرآباد و درکش از سرشاخه‌های این رودخانه می‌باشند که در نهایت به رودخانه ترک می‌ریزند (شکل ۳-۱) [96].

۳-۲-۲- زمین‌شناسی

از دیدگاه زمین‌ساختی، حوضه مذکور در واحد کپه داغ قرار دارد. در امتداد گسل‌های طولی کپه داغ فرونشست رخ داده است. مورفولوژی این منطقه در اثر آخرین فاز چین‌خوردگی‌های آلپ شکل گرفته است. اصلی‌ترین واحدهای سنگی صخره ساز موجود در منطقه، سازندهای کربناته مزدوران و تیرگان می‌باشند [97]. سازندهای این منطقه از قدیم به جدید ترتیب شامل سازندهای چمن بید، مزدوران، تیرگان، سرچشمه سنگانه، آب دراز و کلات از دوران مزوزوئیک و نهشته‌های دوران سنوزوئیک شامل طبقات سرخ‌رنگ نئوژن، کنگلومرای پلیوسن و نهشته‌های آبرفتی کواترنری است (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲. نقشه زمین‌شناسی دشت سملقان (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱: ۲۵۰۰۰)

تشکیلات این سازندها به‌طور عمده سنگ‌آهک، مارن، شیل، ماسه‌سنگ و سنگ‌های تخریبی-تبخیری می‌باشند. مهم‌ترین و تأثیرگذارترین سازندهای این منطقه، سازند تیرگان و رسوبات نئوژن می‌باشند. سازند تیرگان بیشترین آبدهی را داشته و دشت را تغذیه می‌کند، آب‌های موجود در این سازند از کیفیت خوبی برخوردارند. رسوبات نئوژن به علت وجود سنگ‌های تبخیری از کیفیت پایین منابع آب برخوردار هستند [98]. سازندهای تشکیل‌دهنده منطقه توسط عجم و همکاران (۱۳۹۶) مورد بررسی قرار گرفته‌اند [99]. در ادامه این سازندها در جدول ۳-۱ به‌صورت مختصر معرفی خواهند شد.

جدول ۳-۱. سازندهای تشکیل‌دهنده دشت سملقان

نام سازند	ویژگی‌ها
چمن بید (Jd)	از نظر لیتولوژی شامل مارن تیره، قیری و پیریتی آمونیت دار و لایه‌های نازک آهکی
مزدوران (Jmz)	متشکل از آهک ضخیم لایه تا توده‌ای به رنگ روشن، آهک دولومیتی متخلخل و دولومیت
تیرگان (Ktr)	مقاوم در برابر فرسایش، شامل اکثر ارتفاعات منطقه، شامل آهک اوربیتولین دار و با لایه‌بندی اعظم ضخیم لایه تا توده‌ای

سرچشمه (Ksr)	شامل مارنهای خاکستری و شیل‌های مدادی و رسوبات آهکی اوربیتولین دار
سنگانه (Ksn)	شامل شیل‌های سیاه‌رنگی که خود حاوی قلوه‌هایی از رس آهن‌دار بوده و در آن رسوبات سیلتی - آهکی نیز به‌طور فرعی وجود دارد
آب‌دراز (Kad)	از نظر لیتولوژی شامل آهک‌های مارنی سفید و شیل
کلات (Kk)	تشکیل‌شده از آهک‌های تخریبی دانه‌درشت و در آن به‌طور فرعی لایه‌های ماسه‌سنگی نیز دیده می‌شود
کنگلومرای پلیوسن (QIPC)	شامل کنگلومرا و در بخش‌هایی ماسه‌سنگ
مارن (Mur)	شامل مارن‌ها و آهک‌های مارنی سبزرنگ و متشکل از رسوبات رودخانه‌ای، تراس‌های آبرفتی با ضخامت کم و واریزه‌ها
خانگیران (Ekh)	مرز زیرین شامل ماسه‌سنگ و مرز بالایی نهشته‌های قرمز رنگ نفوذن، بسیار فرسایش پذیر
نهشته‌های قدیمی (Qft1)	شیب زیاد و فاقد کاربری
نهشته‌های جدید (Qft2)	بافت متغیر از درشت‌دانه تا ریزدانه، شامل شن، ماسه، سیلت و رس

۳-۲-۴- عناصر اقلیمی منطقه

یکی از اصلی‌ترین گام‌های برنامه‌ریزی در مدیریت منابع آب شناخت منطقه، اقلیم و آب‌وهوای آن است. در ادامه به بررسی پارامترهای اقلیمی دشت سملقان پرداخته‌شده است. عجم و همکاران ویژگی‌های اقلیمی این منطقه را بررسی نموده‌اند. در ادامه به بررسی این ویژگی‌ها پرداخته‌شده است [99].

۳-۲-۴-۱- هواشناسی منطقه

میانگین دما در منطقه سملقان برابر با $14,2^{\circ}$ ، بیشینه دما برابر با $34,4^{\circ}$ درجه و کمترین دما $2,6^{\circ}$ - می‌باشد. تبخیر سالیانه از ایستگاه رسالت، ۱۵۵۷ میلی‌متر است. کمترین میزان تبخیر در این ایستگاه ۳۴ میلی‌متر و بیشترین میزان آن ۲۷۲ میلی‌متر است. متوسط بارش سالیانه در دشت سملقان ۲۸۷,۷۶ میلی‌متر بوده و بیشترین مقدار بارش سالیانه این دشت ۵۳,۶۹ میلی‌متر ثبت‌شده است. میانگین رطوبت

نسبی این منطقه ۵۶٪، کمترین میزان آن ۴۱٪ و بیشترین میزان رطوبت برابر با ۶۹٪ است. جهت وزش باد غالب در دشت سملقان از سمت غرب این منطقه است.

۳-۲-۴-۲- توده‌های هوا

دو جریان و توده هوا که این منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارت‌اند از (شکل ۳-۳):

۱- توده هوای ابری شمالی: این توده هوا با دوره زمانی ۷ ساله از سمت شمال و شمال شرق از روی سیبری یا اروپای شمالی به کشور وارد می‌شود که به شدت دمای هوا را کاهش می‌دهد و ریزش‌های جوی به صورت برف خواهد بود.

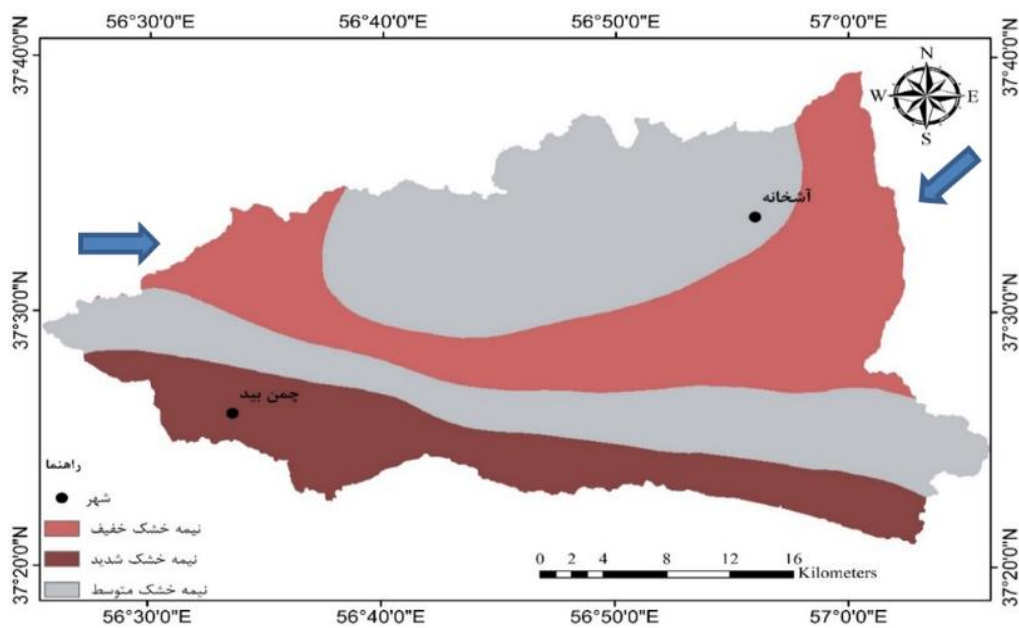
۲- توده هوای استوایی دریایی: این توده از دریای مدیترانه و اقیانوس اطلس به ایران نفوذ می‌کند، غالباً از سمت غرب و شمال غرب وارد شده و اکثر ریزش‌های جوی ایران حاصل این توده است.

۳-۲-۴-۳- اقلیم منطقه

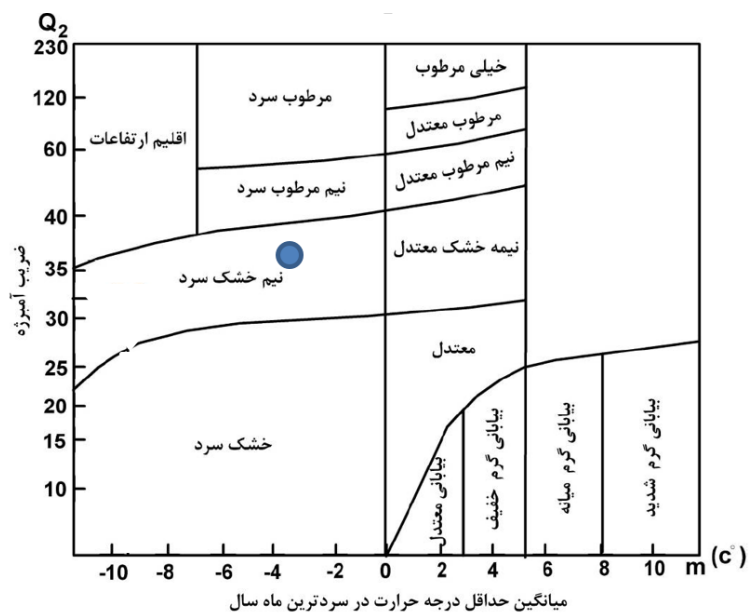
اقلیم نمای آبرژه یکی از شاخص‌های شناسایی اقلیم منطقه با استفاده از داده‌های آب‌وهوا است. این اقلیم‌نما با در نظر گرفتن حداقل‌های دما در سردترین ماه سال (m)، برحسب درجه سانتی‌گراد، میانگین حداکثرهای دما در گرم‌ترین ماه سال (M)، برحسب درجه کلونین و میانگین بارش سالانه (P)، برحسب میلی‌متر) طبق معادله ۳-۱ محاسبه می‌شود [100].

$$Q = \frac{2000P}{M^2 - m^2} \quad (۳-۱)$$

با توجه به این شاخص، اقلیم منطقه مطالعاتی نیمه‌خشک سرد است (شکل ۳-۴).



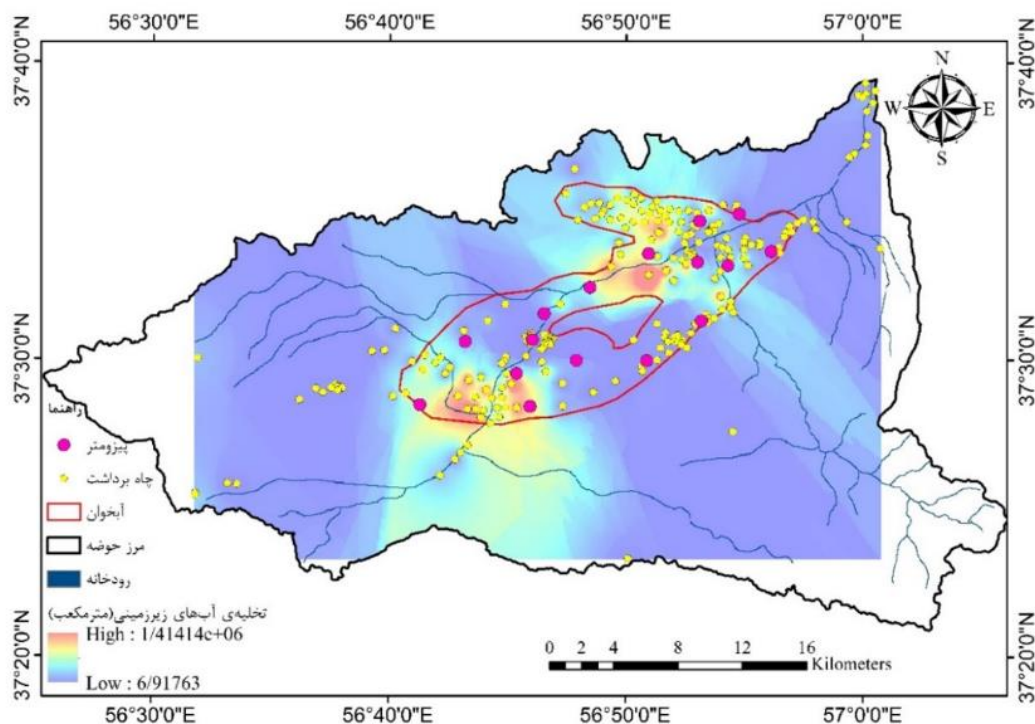
شکل ۳-۳. توده‌های هوایی تأثیرگذار بر منطقه



شکل ۳-۴. اقلیم دشت سملقان با استفاده از اقلیم نمای آمبروزه

۳-۲-۵- وضعیت منابع آبی دشت

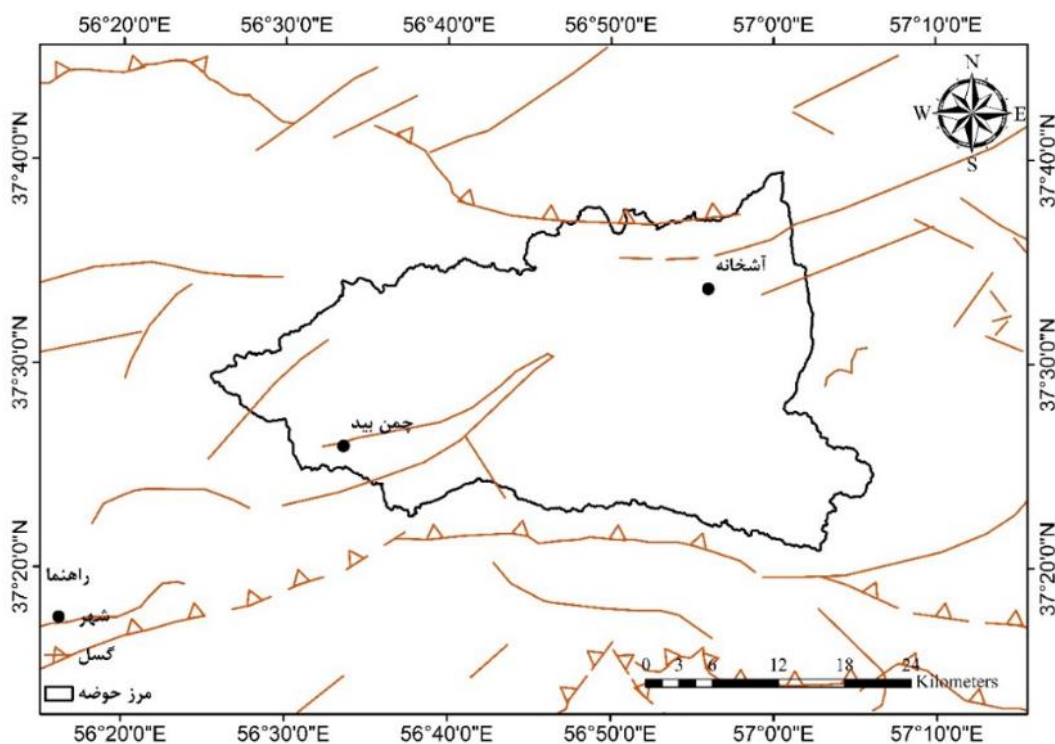
وسعت زیاد سملقان با توجه به حاصلخیزی زمین‌های زراعی، کشاورزانی سخت‌کوش و فعال و استراتژیک بودن آن به لحاظ صادرات، محصولات کشاورزی به‌خصوص پنبه مرغوب، برنج اعلا، گندم، جو و ... نشانگر قابلیت‌ها و استعدادهای سملقان تلقی می‌گردد. طبق آمار بیشترین برداشت آب از منابع زیرزمینی، پس از دشت شیروان-قوچان و اسفراین در سطح استان از این دشت برداشت می‌گردد. دشت سملقان از دشت‌های ممنوعه استان خراسان شمالی است. این دشت دارای ۱۸۲ چاه با بهره‌برداری مجاز و میزان تخلیه ۳۲,۴۶۴ میلیون مترمکعبی با حجم اضافه برداشت ۱۷,۱۷ میلیون مترمکعب و ۱۵۱ چاه غیرمجاز با حجم بهره‌برداری ۳,۶۸۵ میلیون مترمکعب است. از ۱۵ رشته قنات این دشت سالانه ۱,۲ میلیون مترمکعب برداشت انجام می‌شود. توان تغذیه آبخوان‌های این دشت حدود ۵ میلیون مترمکعب در سال است [71]. شکل ۳-۵ نشان‌دهنده موقعیت چاه‌های تخلیه نسبت به دشت سملقان است.



شکل ۳-۵. موقعیت چاه‌های تخلیه و پیژومتری نسبت به دشت، آبخوان و آب‌های سطحی دشت سملقان، با تأکید بر پراکندگی و میزان تخلیه آن‌ها

۳-۲-۶- گسل‌ها

از دیدگاه طبیعی عوامل مختلفی بر وقوع پدیده فرونشست مؤثر هستند که وجود گسل، رخداد پدیده زلزله و خصوصیات خاک از جمله آن‌ها هستند. بر اساس مطالعات پیشین، گسل‌های آشخانه و شوقان بیشترین نقش را در فعالیت‌های لرزه‌ای این منطقه دارند. دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها با بزرگی‌های مختلف متفاوت است، دوره بازگشت زمین‌لرزه با بزرگی ۵ و ۶ ریشتر در این منطقه به ترتیب ۱۱ و ۵۷ سال است. هم‌راستا بودن برخی شکاف‌های بزرگ در دشت سملقان با یکی از شاخه‌های گسل‌های این دشت، احتمال این‌که فعالیت گسل‌ها در توسعه شکاف‌ها نقش داشته را تقویت می‌کند [101]. موقعیت گسل‌های فعال و مؤثر بر دشت در شکل ۳-۶ قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۳-۶. موقعیت گسل‌های فعال نسبت به دشت سملقان

۳-۳- داده‌ها

در این بخش به معرفی داده‌های تهیه‌شده جهت انجام پژوهش پرداخته خواهد شد.

۳-۳-۱- داده‌های ماهواره‌ای

نقشه کاربری اراضی از اداره منابع طبیعی خراسان شمالی تهیه شده است. تصاویر ماهواره‌ای به منظور پردازش‌های تداخل سنجی راداری از ماهواره Sentinel-1، به منظور تهیه اولین تداخل نگار تهیه گردیده. در این مطالعه از دو سری تصویر بالا گذر و پایین گذر ماهواره Sentinel-1 استفاده شده است. اطلاعات این تصاویر در جدول ۳-۲ ذکر شده است.

جدول ۳-۲. ویژگی‌های تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش

Sensor	Orbit	Date	Format	Polarization	Beam
S1A	Ascending	2020.11.13	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2020.08.21	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2020.05.05	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2020.02.23	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2019.12.01	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2019.08.27	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2019.05.23	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2019.02.16	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2018.11.12	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2018.08.08	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2018.05.16	SLC	VV+VH	IW
S1A	Ascending	2018.03.17	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2020.11.07	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2020.08.27	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2020.05.23	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2020.02.29	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2019.12.07	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2019.08.21	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2019.05.22	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2019.02.22	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2018.11.06	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2018.08.04	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2018.05.10	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2018.03.11	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2017.11.11	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2017.08.19	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2017.05.27	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2017.02.08	SLC	VV+VH	IW
S1A	Descending	2016.11.04	SLC	VV	IW
S1A	Descending	2016.08.24	SLC	VV	IW
S1A	Descending	2016.05.20	SLC	VV	IW
S1A	Descending	2016.02.14	SLC	VV	IW
S1A	Descending	2015.11.10	SLC	VV	IW
S1A	Descending	2015.08.06	SLC	VV	IW
S1A	Descending	2015.05.26	SLC	VV	IW
S1A	Descending	2015.02.07	SLC	VV	IW
S1A	Descending	2014.11.03	SLC	VV	IW

۳-۳-۲- داده‌های پیزومتری

همان‌گونه که گفته شد، برداشت بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی موجب کاهش سطح ایستابی و فشار

هیدرو استاتیک شده و از دلایل اصلی وقوع پدیده فرونشست می‌باشد.

به‌منظور تهیه و بررسی نقشه‌های هم‌افت آب زیرزمینی به داده‌های پیزومتری منطقه نیاز است.

موقعیت داده‌های پیزومتری ۱۷ چاه دشت سملقان که از سامانه آمار و گزارش مدیریت منابع آب ایران^۱

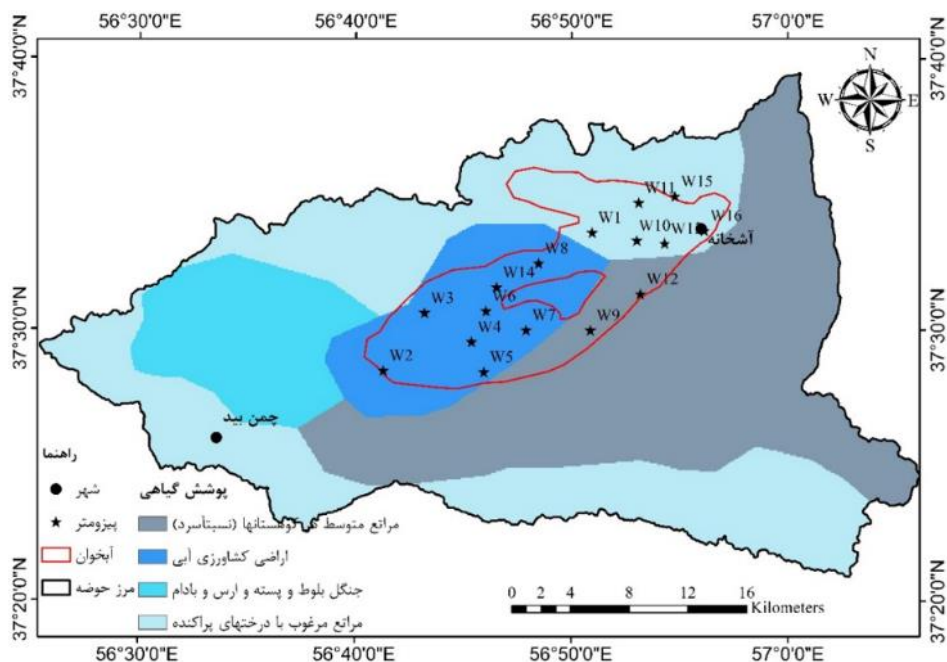
تهیه شده است در جدول ۳-۳ ذکر شده است. موقعیت این نقاط نسبت به دشت سملقان در شکل ۳-۷

قابل مشاهده است.

جدول ۳-۳. اطلاعات چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه در این پژوهش

ID	Name	UTMX	UTMY
W1	ابتدای قوری میدان	492320	4159466
W2	اسلام‌آباد	489928	4152758
W3	اکتشافی عزیزآباد	483033	4154909
W4	اکتشافی قوری میدان	483360	4160232
W5	باغ نوده	474723	4151021
W6	جاده حیدرآباد-قلعه خان	482182	4150345
W7	جاده عزیزآباد قلعه خان	480123	4153427
W8	چاه همتی	486683	4156991
W9	زمان صوفی	479309	4147505
W10	شهرک صنعتی	494309	4157114
W11	قاضی	478461	4149546
W12	قلعه خان	479452	4151647
W13	قلعه نجف	489816	4159078
W14	کلاته قمو	472459	4147676
W15	کنار جاده قره مصلی	489880	4156246
W16	ملاحسن	491657	4156297
W17	مهمانک	486587	4150401

^۱ <http://wrs.wrm.ir/amar>



شکل ۳-۷. موقعیت چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه در دشت سملقان

۳-۴- پردازش داده‌های SAR

در این بخش به مراحل پردازش داده‌های SAR از انتخاب تا تهیه نقشه فرونشست پرداخته خواهد شد.

۳-۴-۱- داندود و آماده‌سازی داده‌های ماهواره راداری Sentinel-1

به‌منظور شروع مراحل پردازش تداخل سنجی راداری ابتدا باید داده‌های مناسب انتخاب و داندود شوند.

داده‌های Sentinel-1 از طریق چند سایت مختلف قابل تهیه هستند. وب‌سایت^۱ USGS، و Nasa^۲ و

Alaska^۳ معتبرترین سایت‌ها هستند. در پژوهش حاضر از داده‌های Sentinel-1 در حالت IW

استفاده‌شده و این تصاویر از سایت Alaska تهیه گردیده‌اند. نحوه انتخاب تصاویر از منطقه مورد مطالعه

^۱ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

^۲ <https://earthdata.nasa.gov/>

^۳ <https://asf.alaska.edu/>

در شکل ۳-۸ قابل مشاهده است. حالت تصویربرداری IW، حالت اصلی برداشت عوارض روی زمین است و همان گونه که در جدول ۱-۲ نشان داده شد، داده ها در عرض ۲۵۰ کیلومتر و با حد تفکیک ۵*۲۰ متر برداشت می شوند.

Search Filters

Date Filters

Start Date

1/1/2020

End Date

12/31/2020

Seasonal Search

Additional Filters

File Type

L1 Single Look Comp...

1/14 file types selected

Beam Mode

IW

1/9 beam modes selected

Polarization

0/8 polarizations selected

Direction

Ascending

1/2 flight directions selected

Subtype

SA

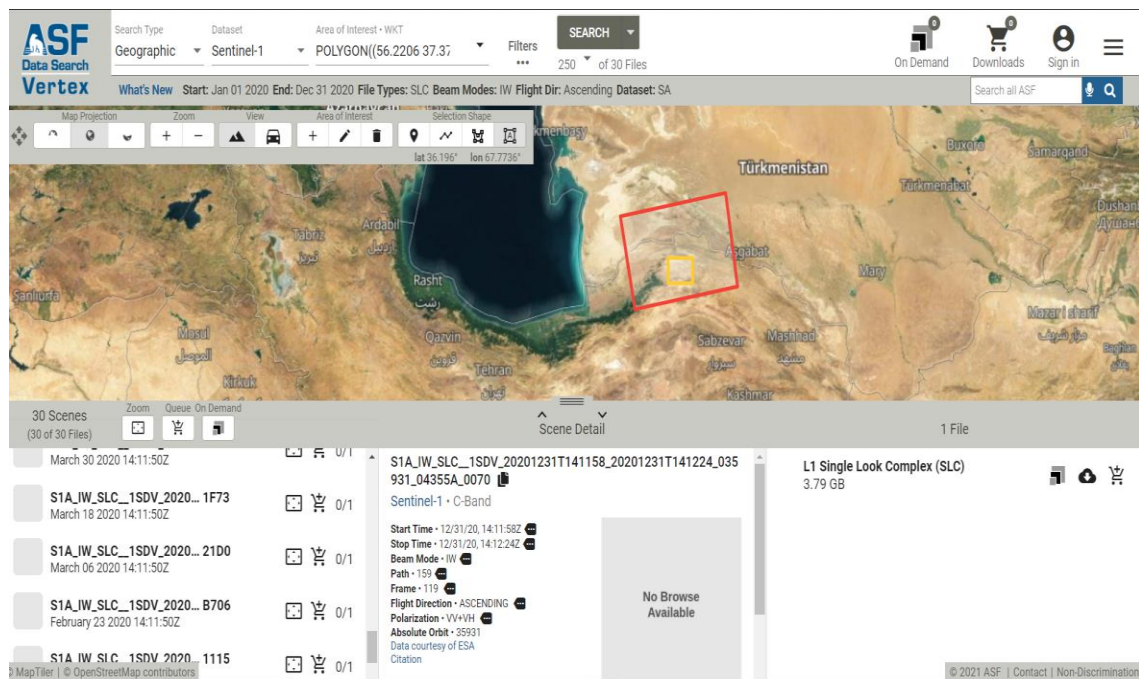
1/2 subtypes selected

شکل ۳-۸. انتخاب ویژگی های تصاویر Sentinel-1 مورد نیاز جهت انجام پردازش های تداخل سنجی راداری در سایت

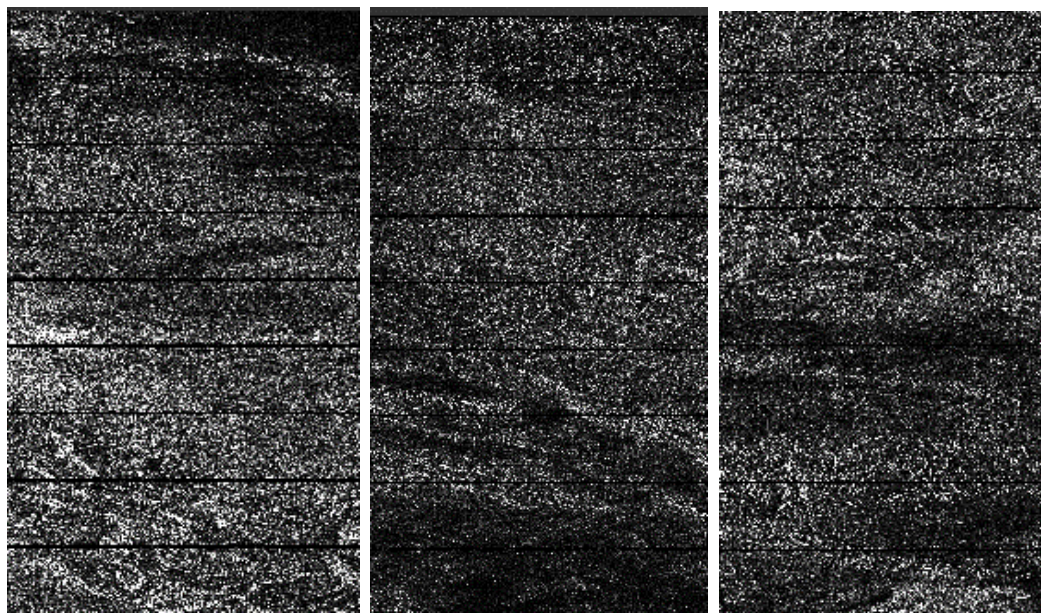
Asf.alaska.edu

پس از انتخاب ویژگی های مورد نظر داده های درخواستی، داده های انتخابی مورد نظر با توجه به بازه زمانی مورد نظر انتخاب و دانلود می گردند. تصاویر موجود در منطقه مطالعاتی برای سنسور S1A در حالت تصویربرداری بالا گذر در شکل ۳-۹ نشان داده شده اند. حجم هر کدام از این داده ها ۳,۷۹ گیگابایت است. حالت IW داده ها را در سه زیر نوار با استفاده از مشاهده عوارض زمین با روش ScanSAR متوالی که به آن TOPSAR گفته می شود، ثبت می کند. در هر زیر نوار IW نیز داده ها در چند قطعه^۱ ذخیره می گردند. شکل ۳-۱۰ نمایانگر زیر نوارها و قطعات ذکر شده است.

^۱ Burst



شکل ۳-۹. موقعیت یک قاب از داده‌های موجود در سال ۲۰۲۰ برای محدوده سملقان در حالت تصویربرداری بالا
گذر



شکل ۳-۱۰. زیر نوارها و قطعات داده‌های Sentinel-1 IW SLC

۳-۴-۲- پردازش

یکی از مهم‌ترین کاربردهای تداخل سنجی راداری، کم کردن دو جفت تداخل نگار از هم می‌باشد که به آن تداخل سنجی تفاضلی گفته می‌شود. کیفیت تداخل نگارها در کیفیت نتایج تأثیرگذار است. فاز تداخل سنجی یک پارامتر مهم و کلیدی در محاسبه جابه‌جایی است. طی چند فرآیند می‌توان همبستگی پیکسل‌ها در تصاویر را بهبود بخشید و کیفیت تداخل نگار را افزایش داد. در ادامه به عوامل مؤثر در اندازه‌گیری جابه‌جایی پرداخته خواهد شد.

۳-۴-۲-۱- هم‌دوسی تصاویر

هم‌دوسی^۱ تصاویر همبستگی دو تصویر SAR را نشان می‌دهد و بیانگر مشابهت آن دو تصویر است. میزان هم‌دوسی در تداخل سنجی از ۰ تا ۱ متغیر است، مقدار ۰ نمایانگر عدم هم‌دوسی بوده و هیچ اطلاعات مفیدی از تداخل نگار نمی‌دهد، مقدار ۱ نمایانگر هم‌دوسی کامل و عدم وجود نویز است. عوامل مختلفی کیفیت تداخل نگار را تحت تأثیر قرار می‌دهند، تغییرات پوشش گیاهی ناشی از تغییر فصل، میزان رطوبت ناشی از باران یا سیل، تغییرات مکانیکی مانند شخم زدن و عوامل دیگر می‌توانند منجر به کاهش هم‌دوسی تصاویر شوند. با افزایش فاصله زمانی تصاویر، هم‌دوسی کاهش می‌یابد. لغزش‌های زمینی، جابجایی توده‌های یخی و فرآیندهای ژئوفیزیکی می‌توانند موجب عدم همبستگی شوند.

۳-۴-۲-۲- داده‌های مداری

استفاده از داده‌های دقیق مداری یکی از مراحل مهم پردازش تداخل سنجی راداری است. داده‌های مداری فایل‌های باینری هستند که دربردارنده موقعیت‌های مداری ماهواره می‌باشند که امکان محاسبه خط مبنا را میسر می‌سازند. خطا در محاسبه این پارامتر بر روی دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی تأثیرگذار است [102].

^۱ Coherence

۳-۲-۴-۳ تأثیرات اتمسفریک

الکترون‌های موجود در یونسفر و بخار آب در تروپوسفر باعث می‌شوند سیگنال امواج میکروویو زودتر یا دیرتر به آنتن برسند و میدان جابه‌جایی مطلق را تحت تأثیر قرار دهند [102]. بخار آب با تغییر ضریب شکست در مسیر انتشار امواج، موجب تأخیر زمانی در آن‌ها می‌شود، اثر آن بر دامنه قابل چشم‌پوشی است اما بر فاز امواج راداری تأثیر می‌گذارد [7].

۳-۲-۴-۳-۵ تأثیرات فاز

خطاهای فازی موجب کاهش همبستگی در تداخل سنجی می‌شوند. ثبت هندسی تصاویر و استفاده از درون‌یابی‌های در حین پردازش از عوامل کاهش همبستگی تصاویر محسوب می‌شوند [102]. اعمال فیلتر میانگین، خطاهای فازی را کاهش داده و تداخل نگار را به حالت طبیعی زمین نزدیک می‌کند.

۳-۲-۴-۳-۶ فاز ناشی از توپوگرافی

در بررسی تغییرات ارتفاعی در یک بازه زمانی در تداخل سنجی راداری، فاز ناشی از توپوگرافی یک عامل مزاحم بوده و باید حذف شود. برای مشخص کردن سهم توپوگرافی در فاز تداخل نگار، از داده‌های ارتفاعی استفاده می‌شود.

۳-۲-۴-۳-۷ فاز ناشی از زمین مسطح

اثر تغییر فاز به علت تغییر زاویه فرود به نام اثر فاز زمین مسطح شناخته می‌شود. هنگامی که زمین مسطح باشد، به دلیل تغییر رنج زمینی و تفاوت زاویه فرود نقاط هم‌ارتفاع فاز متفاوتی از آن نقاط در تداخل نگار ثبت می‌شود. با محاسبه فاز ناشی از این اثر و کم کردن آن از فاز تداخل نگار ایجادشده توسط معادله ۳-۵، خطای ناشی از زمین مسطح حذف خواهد شد [7].

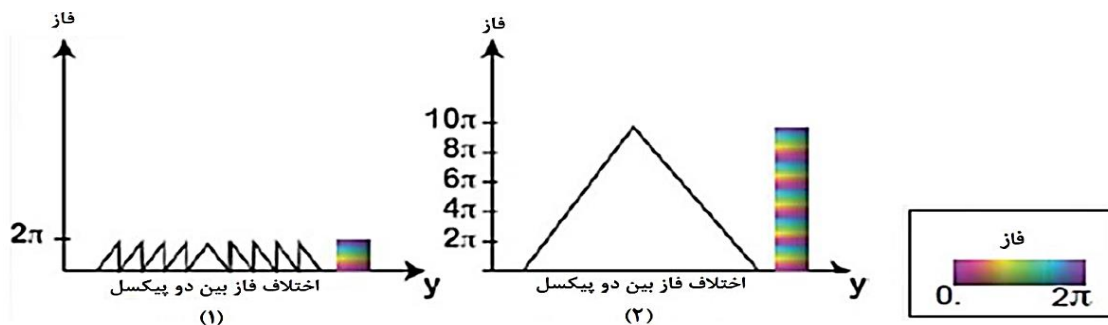
$$\varphi_{flat} = \frac{4\pi B}{\lambda \sqrt{1 + \frac{H^2}{y}}} \quad (5-3)$$

۳-۴-۲-۸- اعوجاج رادیومتری

نویز نقطه نقطه‌ای یکی از اعوجاج‌های رادیومتری است که به دلیل تداخل امواج پراکنش شده ایجاد می‌شود. این نویز موجب ایجاد نقطه‌های روشن و تیره حتی در مناطق همگن می‌شود. این اعوجاج موجب کاهش کیفیت تصویر و دشواری تفسیر آن می‌شود. با اعمال فیلترهای مکانی می‌توان از چند پیکسل همسایه میانگین گرفته و این نویز را کاهش داد [8].

۳-۴-۲-۹- بازیابی فاز

محاسبه اختلاف فاز و اختلاف ارتفاع، قبل از بازیابی فاز فقط در دو پیکسل مجاور امکان‌پذیر است. فاز تداخل نگار حداکثر اختلاف فاز 2π را نمایش می‌دهد و هر سیکل^۱ معرف تغییرات با همین مقدار است. اضافه نمودن مقادیر صحیح اختلاف فاز را بازیابی فاز می‌گویند که فضای گسسته تداخل نگار را به فضای پیوسته تبدیل می‌کند و پس از انجام آن، اختلاف ارتفاع هر دو نقطه موردنظر را می‌توان باکم کردن فاز آن‌ها از یکدیگر محاسبه نمود. شکل ۳-۱۱ نمایانگر بازیابی فاز است.



شکل ۳-۱۱. تفاوت بین فاز تداخل نگار قبل و بعد از بازیابی فاز - (۱) قبل از انجام بازیابی فاز (۲) بعد از بازیابی فاز

۳-۴-۲-۱۰- تبدیل فاز به جابه‌جایی

چنانچه موقعیت نسبی نقاط روی زمین تغییر کند، پس از حذف فازهای ناشی از توپوگرافی، نویز و سایر عوامل، می‌توان مقدار جابه‌جایی را محاسبه نمود [7].

^۱ Fringe

۳-۵- ابزارهای تحقیق

به منظور انجام این پژوهش از سیستم‌عامل‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی به منظور پردازش تصاویر و تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. در ادامه به معرفی مختصر آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۳-۵-۱- سیستم‌های کامپیوتری مورد نیاز

پردازش تصاویر راداری امری پیچیده بوده و نیاز به پردازش‌های سنگین دارد. در سایت آژانس فضایی اروپا ادعا شده حداقل 4GB رم، یک کارت گرافیک و درایورهای به روز برای استفاده از نرم‌افزار SNAP نیاز می‌باشد [67]. البته استفاده از رم 4GB منجر به مواجهه با خطا می‌شود و پردازش به طور کامل انجام نمی‌گیرد. تجربه کاربران نشان داده به حداقل 16GB رم و پردازنده چند هسته‌ای احتیاج است. مراحل پردازش تداخل سنجی راداری بسته به قدرت سیستم ممکن است از چند دقیقه تا چند روز به طول بینجامد. با توجه به این که امکان توقف موقت پردازش در این نرم‌افزار وجود ندارد، در صورتی که از سیستم ضعیفی استفاده گردد ممکن است به آن آسیب وارد شود. با توجه به ماهیت سیستم‌عامل لینوکس، بهتر است مراحل پردازش داده‌های موجود در این سیستم‌عامل انجام گیرد تا و پردازش به بهینه‌ترین حالت ممکن انجام پذیرد. همچنین نصب نمودن هارد SSD بر روی سیستم پیشنهاد می‌شود. مراحل انجام تبدیل فاز اگرچه توسط افزونه‌ای در SNAP قابل انجام است، پروسه‌ای زمان‌بر دارد، انجام این مرحله از پردازش‌ها توسط پکیجی در لینوکس به سادگی و در زمان کوتاه‌تری قابل انجام است.

۳-۵-۲- نرم‌افزار SNAP

آژانس هوایی اروپا، جعبه‌ابزار NEST را به منظور پردازش داده‌های Sentinel-1 توسعه نمود. پس از ادغام جعبه‌ابزارهای سایر ماهواره‌ها سرانجام SNAP^۱ به عنوان یک ابزار چندکاربره برای پردازش داده‌های

^۱ SeNtinel Application Platform

اپتیک و SAR معرفی شد. این نرم افزار توسعه یافته جعبه ابزارهای پیشین بوده و با ساختاری مشترک، قابلیت های پردازشی جدیدی را ارائه می دهد. ساختار SNAP به گونه ای طراحی شده که برای پردازش های سنگین مانند داده های Sentinel-1 بهترین بازدهی را داشته باشد. به منظور پردازش های خاص تداخل سنجی راداری، مثلاً PSI، از طریق ارتباط با بسته های نرم افزاری منبع باز به طور مثال StamPS استفاده می شود [103].

از این نرم افزار به منظور مطالعات مختلف شامل برآورد تغییرات سطح زمین، پایش سیل، زلزله، تهیه نقشه های رقومی و ... استفاده می شود. این نرم افزار قابلیت پردازش داده های ماهواره های Sentinel-1، 3، RADARSAT-2، COSMO-SkyMed، TerraSAR-X، ALOS، ENVISAT، ERS1-2، Landsat، MODIS و SMOS را دارد. ابزارهای متنوع این نرم افزار از طریق فراخوانی توسط کد در زبان پایتون و همچنین برنامه بصری توسط جاوا قابل فراخوانی و اجرا می باشند [67]. از نرم افزار SNAP 7.0 تحت سیستم عامل لینوکس در این مطالعه به منظور پردازش های تداخل سنجی راداری داده های ماهواره Sentinel-1 استفاده شده است.

۳-۵-۳ نرم افزار GIS

GIS به جمع آوری، تولید، نگهداری، بازیابی، تجزیه و تحلیل داده هایی می پردازد که در دنیای واقعی فضایی را اشغال نموده اند. در نگرشی جامع GIS ابزاری است که به منظور ایجاد و تحلیل داده های مکانی از تمامی اطلاعات نظیر آب های زیرزمینی، نقشه های زمین شناسی، منابع جنگلی، آب های سطحی و ... تا داده های انسانی نظیر جمعیت، داده های اقتصادی، سیاسی و اجتماعی و ... بهره می برد. GIS قادر است فضای جغرافیایی را عینیت بخشد، روابط سیستمی را در یک فضای واقعی به طور دقیق تعریف نماید و انسان را در بهره گیری از فضا یاری دهد. در پژوهش حاضر از ArcGIS 10.6 به منظور تهیه نقشه های هم سطح آب زیرزمینی، نقشه های هم افت آب زیرزمینی، بررسی موقعیت چاه های برداشت و مشاهداتی، بررسی داده های ارتفاعی نقاط مختلف، جانمایی منطقه مورد نظر بر نتایج پردازش

تداخل سنجی راداری و مقایسه آن با داده‌های مختلف، بررسی موقعیت آبخوان، آب‌های سطحی، گسل‌ها و... استفاده شده است.

۳-۵-۴- نرم‌افزار ENVI

نرم‌افزار ENVI محیطی برای بصری سازی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای را فراهم می‌آورد. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان انواع روش‌های پردازش تصاویر حاصل از سنجنده‌های هواپرد و فضا برد را به انجام رساند. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان انواع داده‌های سنجنش‌ازدور را در یک محیط کاربرپسند به‌صورت جامع مورد پردازش و آنالیز قرار داد.

این نرم‌افزار توسط کمپانی هریس^۱ توسعه داده شده است. در ادامه چند مورد از مزیت‌های این نرم‌افزار آورده شده است:

- فراهم آوردن امکان پردازش انواع داده‌های سنجنش‌ازدوری فایل مینا و باند مینا
- فراهم آوردن توابع پردازش تصاویر ماهواره‌ای به‌صورت کاربرپسند و گرافیکی
- پردازش داده‌های چند طیفی و ابر طیفی با توان تفکیک مکانی‌های مختلف
- میسر ساختن تبدیل داده‌های رستری به وکتور و خروجی گرفتن از آن‌ها با ویژگی‌های مختلف
- دسترسی به کتابخانه جامع پردازش تصاویر ماهواره‌ای و هوایی
- کاربرپسند بودن و سادگی کار با توابع آن
- شامل شدن الگوریتم‌های پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی
- امکان نوشتن و طراحی پردازش‌های جدیدتر با استفاده از زبان برنامه‌نویسی IDL

^۱ <https://www.l3harris.com/>

این نرم‌افزار از تصاویر مختلف پشتیبانی می‌کند. کاربران GIS می‌توانند با اطمینان از این نرم‌افزار استفاده کنند و تصاویر جغرافیایی را به صورت دقیق و قابل اطمینان استخراج کنند به این دلیل که از ENVI و GIS با یکدیگر ادغام شده‌اند. کمپانی هریس و اسری با همکاری یکدیگر راه‌حلی ارائه داده‌اند که کاربران GIS را قادر می‌سازد با اطمینان خاطر به آنالیز تصاویر به منظور حل مسائل خود بپردازند. از نرم‌افزار ENVI 5.3 در مطالعه حاضر به منظور تهیه نقشه‌های پوشش گیاهی در بازه مورد مطالعه استفاده شده است.

۳-۵-۵- نرم‌افزار Excel

نرم‌افزار Excel از جمله کاربردی‌ترین مجموعه نرم‌افزارهای Microsoft Office است، اکسل یک نرم‌افزار صفحه گسترده است؛ به عبارت دیگر Excel جدولی بسیار بزرگ است که این امکان را به کاربر می‌دهد تا بسته به نیاز خود برای هر سلول از این جدول داده تعریف نماید، فرمول نویسی انجام دهد، ظاهر هر سلول را به دلخواه تغییر داده و یا محدودیت‌های دسترسی برای هر سلول تعریف کند. نرم‌افزار Excel تاکنون در نسخه‌های متفاوتی برای استفاده در سیستم‌عامل‌های Windows، Mac، Android و IOS در اختیار کاربران قرار داده شده است. کاربرد نرم‌افزار اکسل با توجه به گستردگی ابزارهایی که در آن گنجانده شده است، در تمام حوزه‌های کاری که به نوعی با دسته‌بندی و تحلیل داده‌ها، فرمول نویسی، بانک‌های اطلاعاتی یا گزارش‌گیری سروکار دارند ملموس است. به منظور آماده‌سازی داده‌های مربوط به موقعیت چاه‌ها، بررسی افت سطح آب‌های زیرزمینی، درون‌یابی داده‌های مفقود، روند تغییرات سطح آب در هر کدام از چاه‌های مشاهداتی و بررسی همبستگی تغییرات از Excel 2013 استفاده شده است.

۳-۶- مراحل انجام تحقیق

به منظور انجام این تحقیق نیاز به داده‌های مختلف هیدرولوژیکی شامل داده‌های چاه‌های مشاهداتی و چاه‌های بهره‌برداری است. داده‌های پی‌زومتری دشت سملقان از سال ۸۷ تا سال ۹۷ مربوط به ۱۷ چاه

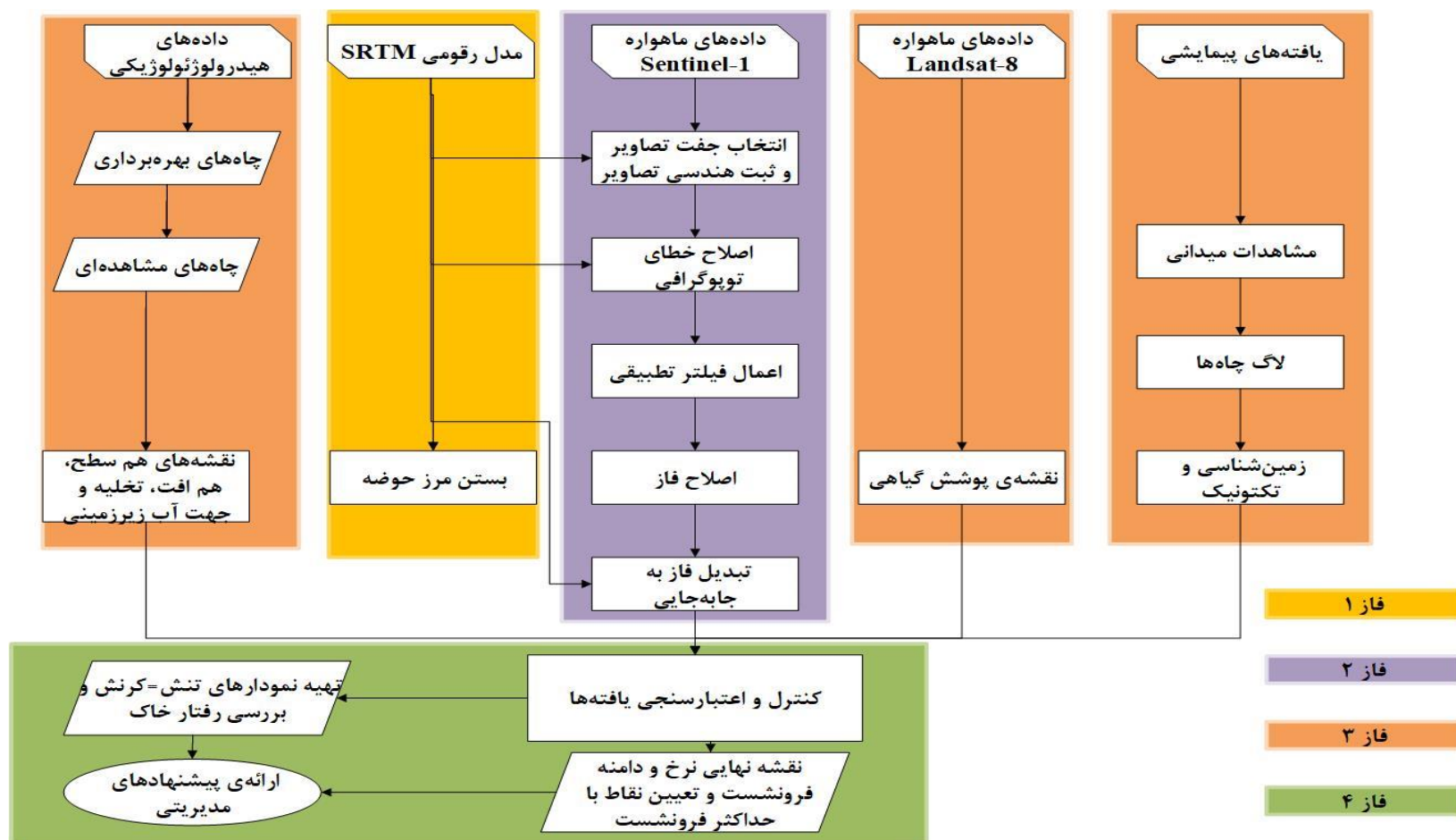
جمع‌آوری شده‌اند. همچنین احتیاج به داده‌های مشاهدات میدانی و زمین‌شناسی می‌باشد. از این داده‌ها بعداً به‌منظور کنترل صحت و اعتبارسنجی یافته‌ها استفاده می‌شود.

به‌منظور انجام این پژوهش، روش تداخل‌سنجی تفاضلی با بهره‌گیری از ۳۷ فریم تصویر ماهواره Sentinel-1 در دو سری بالا‌گذر و پایین‌گذر برای تهیه نقشه‌های فرونشست دشت سملقان در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۴ به کار گرفته شده است. به‌منظور کاهش خطاهای ناشی از عدم همدوسی تلاش شده تا در هر سال ۴ تصویر از فصول مختلف سال با کمترین اختلاف خط مبنای مکانی تهیه گردد. برای حذف اثر توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری SRTM^۱ بهره‌گیری شده است. همچنین به‌منظور حذف فاز ناشی از مسطح بودن زمین از داده‌های مداری ماهواره Sentinel-1 استفاده شده است که توسط نرم‌افزار SNAP به‌صورت خودکار بارگیری می‌شوند. به‌منظور کاهش نویز تداخل نگارهای تولیدی از فیلتر گلداشتاین استفاده گردیده است. بازیابی فاز تداخل نگارها از طریق انتقال به بسته نرم‌افزاری SNAP^۲ و پردازش با آن انجام شده است. نتایج حاصله به SNAP بازگردانی شده و پس‌از آن فاز نهایی تبدیل به مقدار جابه‌جایی شده است. نقشه‌های نهایی ژئورفرنس شده و آماده تحلیل گشته‌اند. پس از تولید نقشه اولیه نرخ و دامنه فرونشست، آن را با داده‌های جمع‌آوری شده میدانی مقایسه کرده و یافته‌ها اعتبارسنجی شدند. سپس اقدام به تهیه نمودارهای تنش-کرنش و بررسی رفتار خاک گردیده و در نهایت ایده‌هایی به‌منظور بهبود مدیریت پایدار منطقه بیان شده است. مراحل انجام تحقیق در شکل ۳-۱۲ در ۴ فاز ترسیم شده است. فاز اول شامل ترسیم موقعیت منطقه مورد مطالعه، فاز دوم تهیه داده‌های راداری و تولید نقشه فرونشست، فاز سوم بررسی سایر داده‌ها شامل آب‌های زیرزمینی، ماهواره لندست، داده‌های زمین‌شناسی و تکتونیک، لاگ چاه‌ها و ... و فاز چهارم شامل ارزیابی نتایج و نتیجه‌گیری نهایی است. در ادامه مراحل انجام تحقیق به‌صورت مرحله‌ای ارائه شده است:

^۱ Shuttle Radar Topography Mission

^۲ SNAPHU Package

- جمع‌آوری داده‌های موردنیاز و انجام مطالعات کتابخانه‌ای
- تهیه داده‌های زمینی به‌منظور بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و تهیه نقشه‌های مرتبط با آب زیرزمینی
- تهیه داده‌های ماهواره‌ای موردنیاز و بررسی روند تغییرات سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری
- بررسی تغییرات پوشش اراضی
- بررسی رابطه بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست ایجادشده و میزان همبستگی آن‌ها در نقاط بحرانی
- بررسی رفتار متقابل آبخوان
- بررسی راهکارهای موردنظر و ارائه پیشنهادهایی جهت بهبود تغییرات ایجادشده در سطح زمین با توجه به رفتار زمین در منطقه مورد مطالعه



شکل ۳-۱۲. ساختار کلی انجام تحقیق

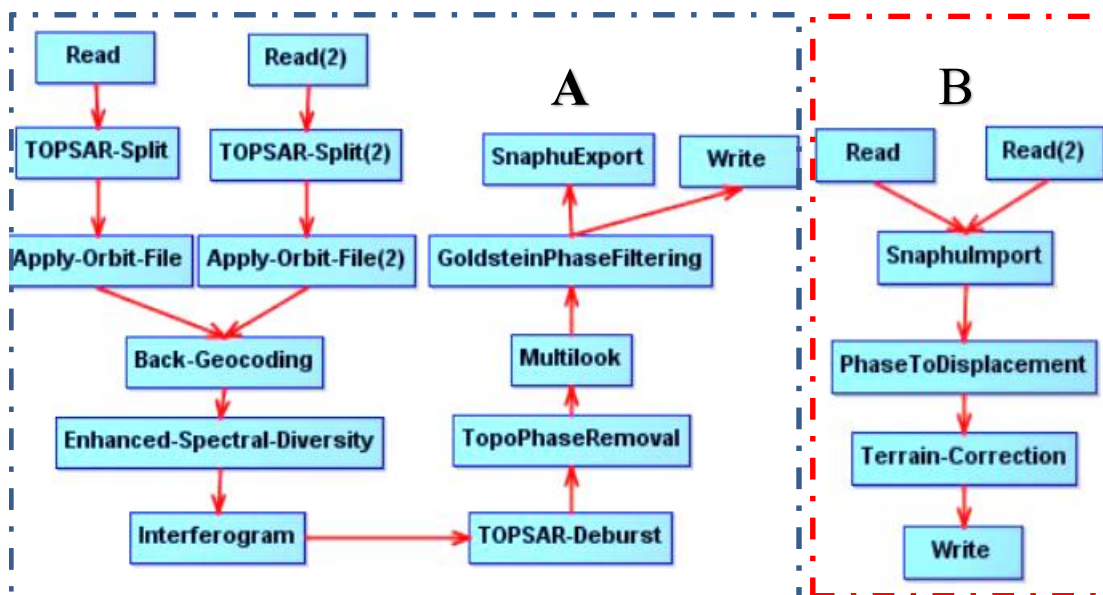
فصل ۴: نتایج تحقیق

۴-۱- مقدمه

در این فصل به بیان نتایج حاصل از پردازش داده‌های ماهواره‌ای و بررسی فرونشست، همچنین داده‌های زمینی و بررسی تغییرات سطح آب پرداخته خواهد شد.

۴-۲- پردازش داده‌های ماهواره‌ای

مراحل پردازش داده‌های تهیه‌شده سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۴ در نرم‌افزار SNAP به کمک تکنیک DInSAR به‌منظور فراهم آوری بستر تحلیل در منطقه مورد مطالعه اجرا گردیده است. در این بخش مراحل آماده‌سازی داده‌ها به‌اختصار شرح داده خواهد شد. فلوچارت مراحل انجام DInSAR در نرم‌افزار SNAP در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. محاسبه میزان فرونشست در سه فاز انجام می‌شود که دو فاز آن در نرم‌افزار SNAP انجام شده و در بخش‌های (A) و (B) قابل مشاهده هستند. ابتدا بخش (A) انجام شده و نتایج این بخش با یک دستور در لینوکس پردازش می‌شود، پس‌از آن مجدداً در نرم‌افزار SNAP ادامه پردازش‌ها انجام خواهد شد.



شکل ۴-۱. مراحل انجام تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری در نرم‌افزار SNAP

۴-۲-۱- انتخاب زوج تصاویر

همان گونه که گفته شد، به منظور کاهش عدم همدوسی و خطاهای ناشی از آن تصاویر به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که اختلاف زمانی و مکانی کمی داشته باشند. زوج تصاویر انتخاب شده در این مطالعه در جدول ۴-۱ و ۴-۲ نشان داده شده‌اند. روش انتخاب زوج تصاویر برای پردازش به صورت a-b, b-c, c-d و ... بوده که برای تصاویر بالا گذر پردازش از تصویری که زودتر تصویربرداری آن انجام شده است (به طور مثال ۲۰۱۸،۰۳،۱۷) برای تصاویر پایین گذر از تصویری که تصویربرداری آن پس از انجام واقعه انجام گرفته است (به طور مثال ۲۰۲۰،۱۱،۱۳) به عنوان تصویر اصلی بهره‌گیری شده است. دلیل انتخاب تصاویر اصلی به صورت برعکس در این دو سری داده سهولت تحلیل نتایج فرونشست می‌باشد. به این علت که مقادیر مثبت و منفی در تصاویر بالا گذر و پایین گذر قرینه یکدیگر می‌باشند.

جدول ۴-۱. تداخل نگارهای ایجاد شده برای تصاویر بالا گذر

Interferogram ID	Master	Slave	Interferogram ID	Master	Slave
A1	2018.03.17	2018.05.16	A7	2019.08.27	2019.12.01
A2	2018.05.16	2018.08.08	A8	2019.12.01	2020.02.23
A3	2018.08.08	2018.11.12	A9	2020.02.23	2020.05.05
A4	2018.11.12	2019.02.16	A10	2020.05.05	2020.08.21
A5	2019.02.16	2019.05.23	A11	2020.08.21	2020.11.13
A6	2019.05.23	2019.08.27			

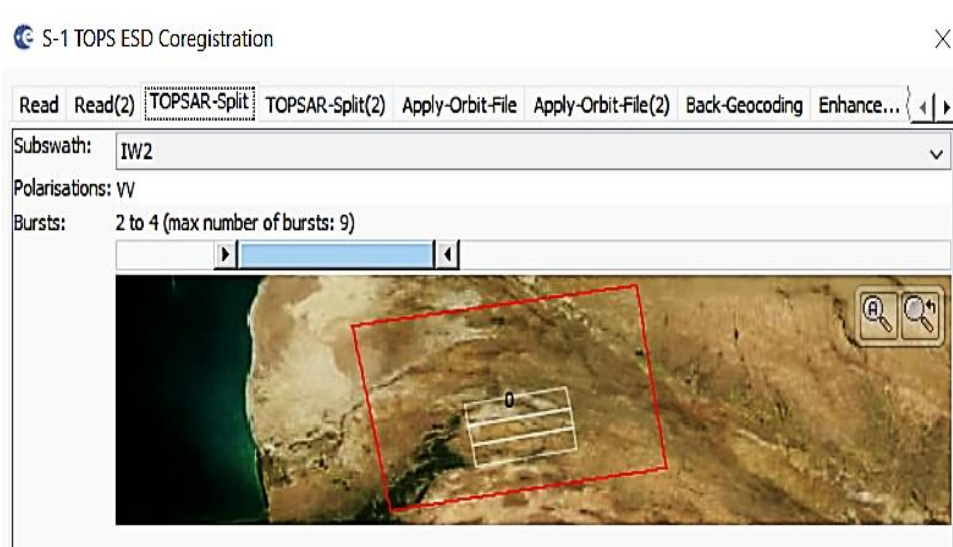
جدول ۴-۲. تداخل نگارهای ایجاد شده برای تصاویر پایین گذر

Interferogram ID	Master	Slave	Interferogram ID	Master	Slave
D1	2020.11.07	2020.08.27	D13	2017.11.11	2017.08.19
D2	2020.08.27	2020.05.23	D14	2017.08.19	2017.05.27
D3	2020.05.23	2020.02.29	D15	2017.05.27	2017.02.08
D4	2020.02.29	2019.12.07	D16	2017.02.08	2016.11.04
D5	2019.12.07	2019.08.21	D17	2016.11.04	2016.08.24
D6	2019.08.21	2019.05.22	D18	2016.08.24	2016.05.20
D7	2019.05.22	2019.02.22	D19	2016.05.20	2016.02.14
D8	2019.02.22	2018.11.06	D20	2016.02.14	2015.11.10
D9	2018.11.06	2018.08.04	D21	2015.11.10	2015.08.06
D10	2018.08.04	2018.05.10	D22	2015.08.06	2015.05.26
D11	2018.05.10	2018.03.11	D23	2015.05.26	2015.02.07
D12	2018.03.11	2017.11.11	D24	2015.02.07	2014.11.03

۴-۲-۲- ثبت هندسی تصاویر

به منظور انجام پردازش‌های تداخل‌سنجی، دو یا تعداد بیشتری تصویر به صورت یک پشته^۱ هم مرجع می‌گردند که همان‌طور که قبلاً گفته شد تصویر اول به عنوان تصویر اصلی و سایر تصاویر به عنوان تصویر پیرو شناخته می‌شوند. به منظور هم مرجع کردن تصاویر، پیکسل‌های تصاویر پیرو نسبت به تصویر اصلی هم‌تراز می‌شوند. این مرحله موجب می‌شود هر هدف زمینی در هر دو تصویر در موقعیت مشابه شناخته شود [7].

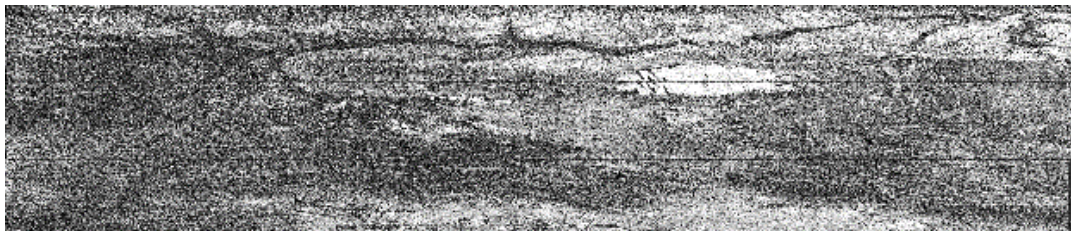
تصاویر Sentinel-1 IW SLC دارای سه زیر نوار و در هر زیر نوار شامل ۹ قطعه می‌باشند. به منظور هم مرجع نمودن تصاویر در این نرم‌افزار، اگر منطقه در دو زیر نوار قرار دارد، در هر مرحله انتخاب منطقه باید در یکی از این زیر نوارها صورت پذیرد. در صورتی که منطقه موردنظر در دو نوار تصویربرداری قرار دارد می‌توان پس از انجام پردازش‌ها آن‌ها را به هم متصل نمود. موقعیت منطقه سملقان در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



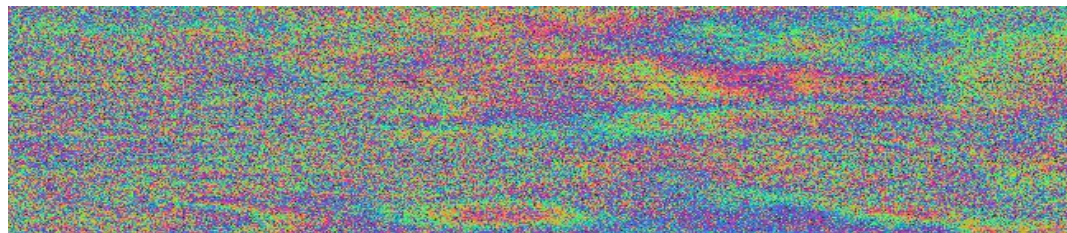
شکل ۴-۲. زیر نوار IW2 و موقعیت منطقه مورد مطالعه در مستطیل‌های سفیدرنگ

^۱ Stack

در بین قطعه‌های تصویر ممکن است تخمین آزمون اشتباه انجام شود. در نرم‌افزار SNAP گزینه‌ای به نام ESD^۱ وجود دارد که از داده‌های پیکسل‌های قطعه مجاور به منظور تصحیح آزمون و دامنه استفاده می‌کند [104]. انجام این مرحله در نرم‌افزار SNAP با فراخوانی از منوی Radar> Coregistration> S1 TOPS Coregistration with ESD صورت می‌گیرد. نقشه رقومی ارتفاعی منطقه موردنظر و فایل‌های مداری به صورت خودکار و دستی قابل تهیه می‌باشند، در این پژوهش داندود این فایل‌ها به صورت خودکار توسط نرم‌افزار انجام گرفته است. به منظور پردازش تصاویر بالا گذر از نوار IW2 و به منظور پردازش تصاویر پایین گذر از نوار IW1 استفاده شده است. شکل ۳-۴ (الف و ب) نشان‌دهنده همدوسی و فاز خروجی حاصل از ثبت هندسی تداخل نگار D11 هستند. همانگونه که در فصل سوم توضیح داده شد، بالاترین همدوسی مربوط به عدد ۱ می‌باشد که در نقشه بارنگ سفید دیده می‌شود. کمترین همدوسی نیز ۰ است که بارنگ سیاه نشان داده می‌شود. به این مرحله هم مرجع کردن تصاویر هم گفته می‌شود.



(الف)



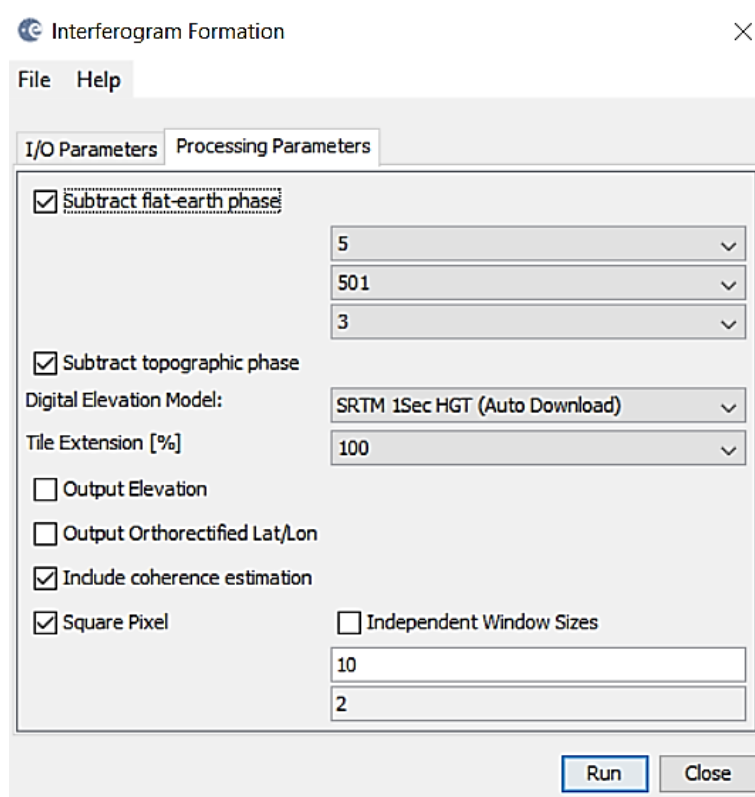
(ب)

شکل ۳-۴. (الف) همدوسی پشته تشکیل شده D11 (ب) تصویر فاز تداخل نگار D11

^۱ Enhanced Spectral Diversity

۴-۲-۳- تولید تداخل نگار

همان گونه که قبلاً گفته شد، یک تداخل نگار از ضرب تصویر اصلی با مزدوج تصویر پیرو به دست می آید. به منظور تهیه تداخل نگار در نرم افزار SNAP از دستور Interferogram Formation از منوی > Radar Products > Interferometric و خروجی های مرحله قبل استفاده می شود. تنظیمات اعمال شده در این مرحله در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴. تنظیمات مورد نیاز برای تهیه تداخل نگار در نرم افزار SNAP

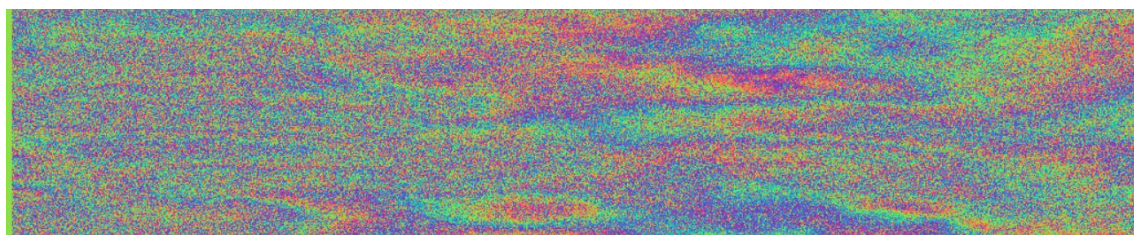
۴-۲-۴- اتصال قطعه های تصاویر

منطقه سملقان توسط ۳ قطعه از یک زیر نوار تصاویر Sentinel-1 پوشش داده شده است. به منظور پردازش این ۳ قطعه باید آن ها را ب صورت یکپارچه به هم متصل نمود تا به صورت یک تصویر مورد پردازش قرار گیرند. اتصال قطعات تصویر توسط دستور S-1 TOPS Deburst انجام می گیرد. به منظور

دسترسی به این دستور باید از منوی Radar>Sentinel-1 TOPS استفاده نمود. تصویر حاصل از این مرحله در شکل ۴-۵ قابل مشاهده است. در ادامه به رفع خطاهای موجود در تداخل نگار پرداخته خواهد شد.



(الف)



(ب)

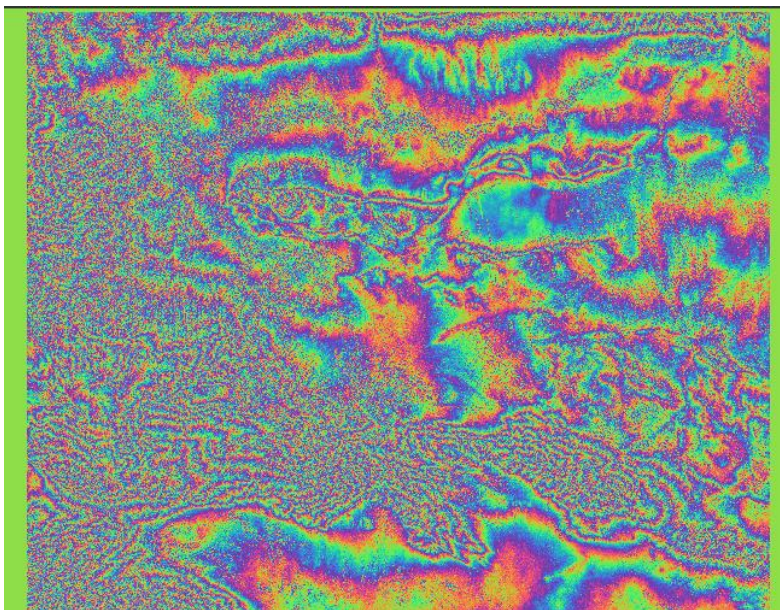
شکل ۴-۵. تصویر (الف) همدوسی و (ب) فاز حاصل از اتصال قطعات زیر نوار IW1 تداخل نگار D11

۴-۲-۵- حذف اثر توپوگرافی

نرم افزار SNAP، به منظور حذف اثر توپوگرافی از تداخل نگار، با استفاده از یک نقشه رقومی ارتفاعی یک تداخل نگار را شبیه سازی می کند و با کم کردن آن از تداخل نگار پردازش شده، اثر توپوگرافی را حذف می کند. در این پژوهش به منظور حذف اثر توپوگرافی از نقشه رقومی ارتفاعی ۳۰ متری SRTM با استفاده از دستور Topographic Phase Removal استفاده شده است. در این مرحله گزینه Output topographic phase باید فعال باشد. فاز تداخل نگار پردازش شده در این مرحله در شکل ۴-۶ قابل مشاهده است.

۴-۲-۶- چند منظرسازی

از این پردازش به عنوان یک الگوریتم برای کاهش نویز فاز در تداخل سنجی راداری استفاده می شود. این الگوریتم با استفاده از تخمین حداکثر درستنمایی^۱ تداخل نگار را بهبود می بخشد. به منظور کاهش نویزهای نقطه نقطه ای در تداخل نگار و بهبود قابلیت تفسیر تصویر می توان از چند منظرسازی در Radar>SAR Utilities>Multilooking استفاده نمود. شکل ۴-۶ نشان دهنده خروجی این مرحله می باشد.



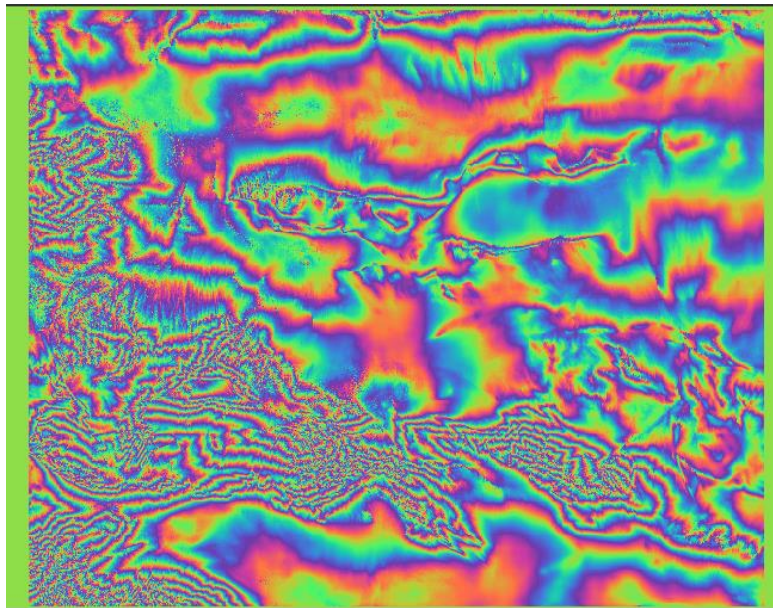
شکل ۴-۶. تداخل نگار D11 پس از حذف اثر توپوگرافی و انجام عملیات چند منظرسازی

۴-۲-۷- اعمال فیلتر گلدشتاین

به منظور کاهش نسبت نویز به فاز، باید از فیلتر تطبیقی استفاده شود. هنگامی که همدوسی تصویر پایین باشد، الگوی تداخلی نیز دچار مشکل می شود. پیش از بازبایی فاز باید نسبت فاز به نویز را افزایش داد. این کار دقت و صحت اطلاعات را در مراحل بعدی افزایش خواهد داد. با میانگین گیری از پیکسل های

^۱ Maximum likelihood estimation

مجاور، اختلافات فاز کمی هموارتر می‌شود [105]. فیلتر گلدشتاین یک الگوریتم تطبیقی غیرخطی است که با اجرای آن نسبت سیگنال به نویز در فاز تداخل نگار افزایش می‌یابد [7]. فاز تداخل نگار پس از اعمال فیلتر گلدشتاین در شکل ۷-۴ نشان داده شده است. دسترسی به فیلتر گلدشتاین از منوی Radar>Interferometric>Goldestein phase filtering استفاده می‌کنیم.



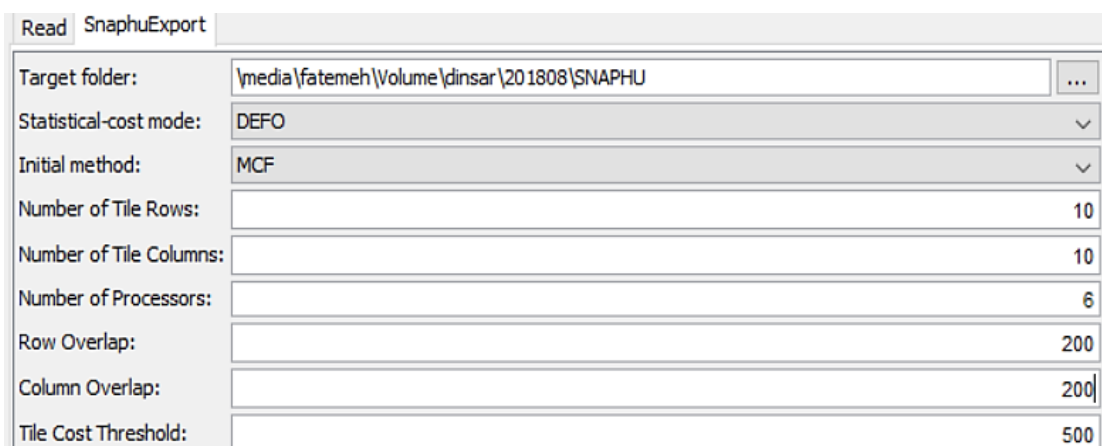
شکل ۷-۴. تداخل نگار D11 پس از اعمال فیلتر گلدشتاین

۴-۲-۸- بازیابی فاز

اختلاف فاز در تداخل نگار تولید شده در بازه $(-\pi, \pi)$ رادیان قرار دارد، این مسئله باعث گسستگی مناطق می‌شود که به آن پیچیدگی فاز می‌گویند. به منظور واپیچش^۱ و تولید مقادیر پیوسته در تداخل نگار، الگوریتم‌های زیادی تولید شده‌اند [106]. بازیابی فاز در آخرین نسخه‌های نرم‌افزار SNAP از طریق افزونه Snaphu Unwrapping امکان‌پذیر است، اما از طریق اجرای کد در ترمینال لینوکس این کار سریع‌تر انجام می‌شود. به همین دلیل یک خروجی از تصویر با استفاده از منوی

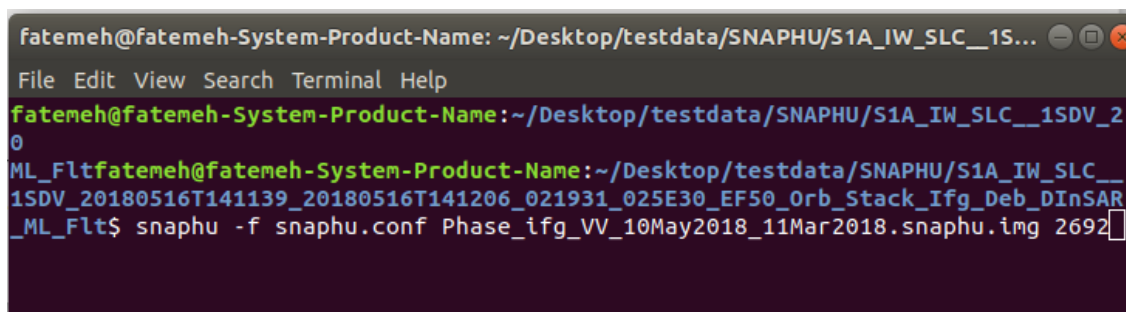
^۱ Unwrapping

Radar>Interfermetric>Unwrapping>Snaphu Export تهیه می‌گردد. به‌منظور انجام این پردازش‌ها باید پکیج Snaphu از سایت^۱ GitHub دانلود و نصب شود. برای خروجی گرفتن از SNAP، Statistical-cost mode در حالت DEFO، Initial method در حالت MCF، Row overlap و Column overlap را به مقدار ۲۰۰ تنظیم می‌شوند. سایر پارامترها بسته به قدرت سیستم پردازشگر قابل اصلاح است. پس‌از آن با استفاده از فایل snaphu.conf دستور تولیدشده را در ترمینال لینوکس کپی کرده و اجرا می‌شود. بسته به توان پردازش هر سیستم ممکن است از چند دقیقه تا چندین ساعت این پردازش طول بکشد. نحوه اجرای این مرحله یک نمونه از فایل‌ها در شکل ۴-۸ قابل مشاهده است.



Read SnaphuExport	
Target folder:	\media\fatemeh\Volume\dinsar\201808\SNAPHU
Statistical-cost mode:	DEFO
Initial method:	MCF
Number of Tile Rows:	10
Number of Tile Columns:	10
Number of Processors:	6
Row Overlap:	200
Column Overlap:	200
Tile Cost Threshold:	500

(الف)



```
fatemeh@fatemeh-System-Product-Name: ~/Desktop/testdata/SNAPHU/S1A_IW_SLC__1SDV_20180516T141139_20180516T141206_021931_025E30_EF50_Orb_Stack_Ifg_Deb_DIInSAR_ML_Flt$ snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_VV_10May2018_11Mar2018.snaphu.img 2692
```

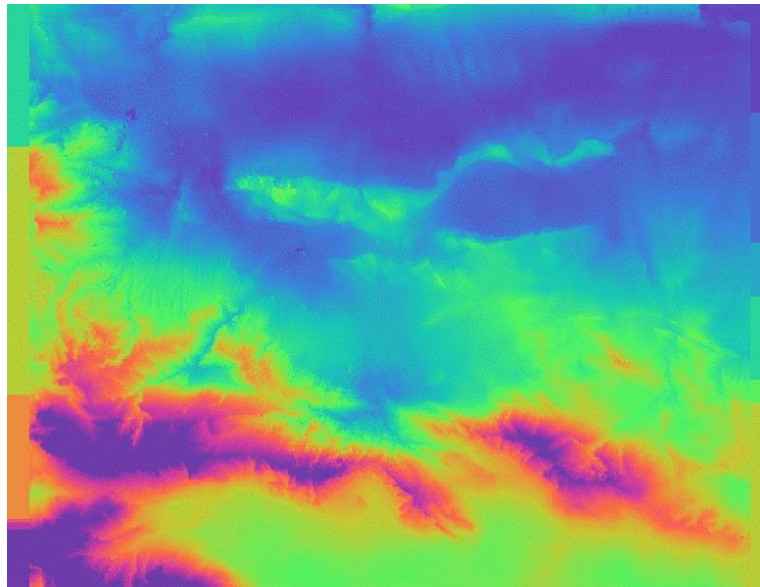
(ب)

شکل ۴-۸. اجرای بازیابی فاز توسط الگوریتم SNAPHU، (الف) خروجی گرفتن از نرم‌افزار SNAP، (ب) اجرای

دستور در ترمینال لینوکس

^۱ <https://github.com/>

پس از پایان پردازش نیاز است تا تصویر را جهت تولید نقشه جابه‌جایی به نرم‌افزار SNAP بازگردانیم که از طریق مسیر قبلی و انتخاب Snapu Import قابل دسترسی است. تصویر حاصل از واپیچش فاز تداخل نگار D11 در شکل ۴-۹ دیده می‌شود. همان گونه که مشاهده می‌شود فضای گسسته فاز تداخل نگار به صورت فاز پیوسته درآمده و سیکل‌های رنگی حذف شده‌اند.



شکل ۴-۹. تداخل نگار D11 بعد از اعمال بازیابی فاز

۴-۲-۹- تبدیل فاز به جابه‌جایی

با توجه به ترتیب انتخاب تصاویر اصلی و پیرو، مقادیر منفی در تصویر به دست آمده به معنی دور شدن از ماهواره و پایین رفتن سطح زمین نسبت به سطح قبلی (فرونشست) و مقادیر مثبت به معنی نزدیک شدن به ماهواره نسبت به تصویر قبلی (بالا آمدگی) طی فاصله زمانی دو تصویر اخذ شده توسط ماهواره هستند. واضح است که مقدار صفر نشان دهنده عدم حرکت نقطه مورد نظر بین زمان دو تصویر است. نقشه جابه‌جایی را می‌توان با استفاده از دستور Phase to Displacement از مسیر Interferometric>Products>Phase to Displacement تهیه نمود.

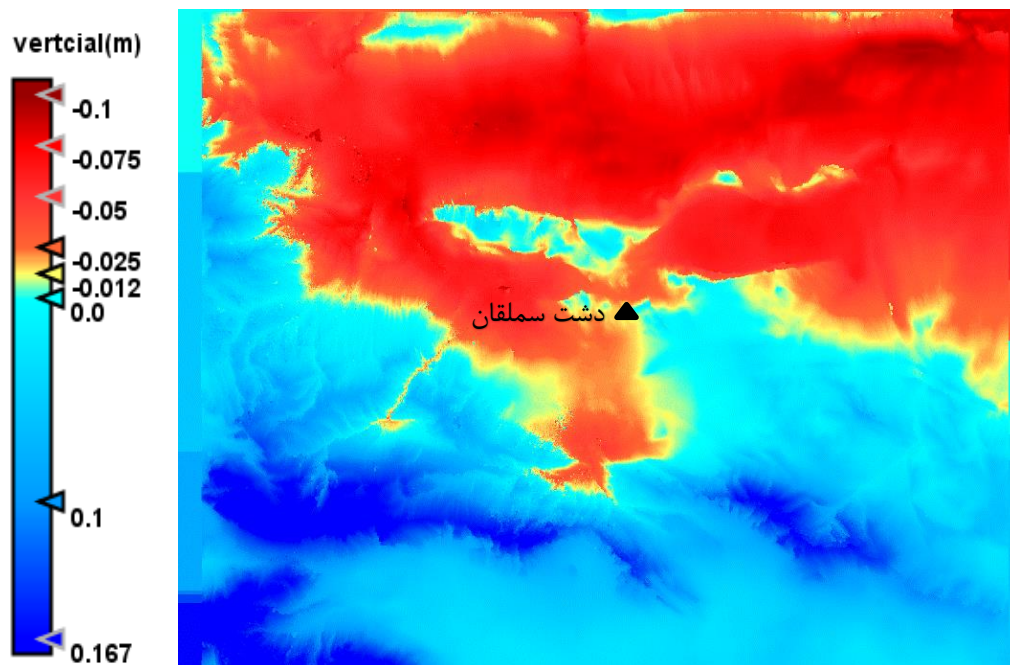
عملگر موجود در SNAP میزان جابه‌جایی را در راستای خط دید ماهواره محاسبه می‌نماید، با توجه

به تعریف فرونشست احتیاج به محاسبه جابه‌جایی عمودی زمین می‌باشد. جهت محاسبه نقشه جابه‌جایی عمودی می‌توان از رابطه ۴-۱ استفاده نمود.

$$vertical\ disp = \frac{\varphi_{unw} * \lambda}{-4\pi * \cos(rad(inc))} \quad (4-1)$$

که در آن میزان جابه‌جایی عمودی از طریق تقسیم حاصل ضرب فاز جابه‌جایی (φ_{unw}) در λ که طول موج سنجنده راداری است بر کسینوس زاویه فرود ماهواره در $4\pi -$ به دست می‌آید [107]. به منظور محاسبه جابه‌جایی عمودی، از دستور Bandmath با استفاده از راست کلیک روی تصویر موردنظر و انتخاب باندهای موردنظر استفاده می‌گردد.

همان‌گونه که نقشه جابه‌جایی تداخل نگار D11 در شکل ۴-۱۰ نشان می‌دهد، در سمت راست تصویر، فرونشست به میزان بیشینه ۲۹ سانتی‌متر رخ داده است. مناطق آبی نقاطی هستند که در آن‌ها فرونشستی رخ نداده است.



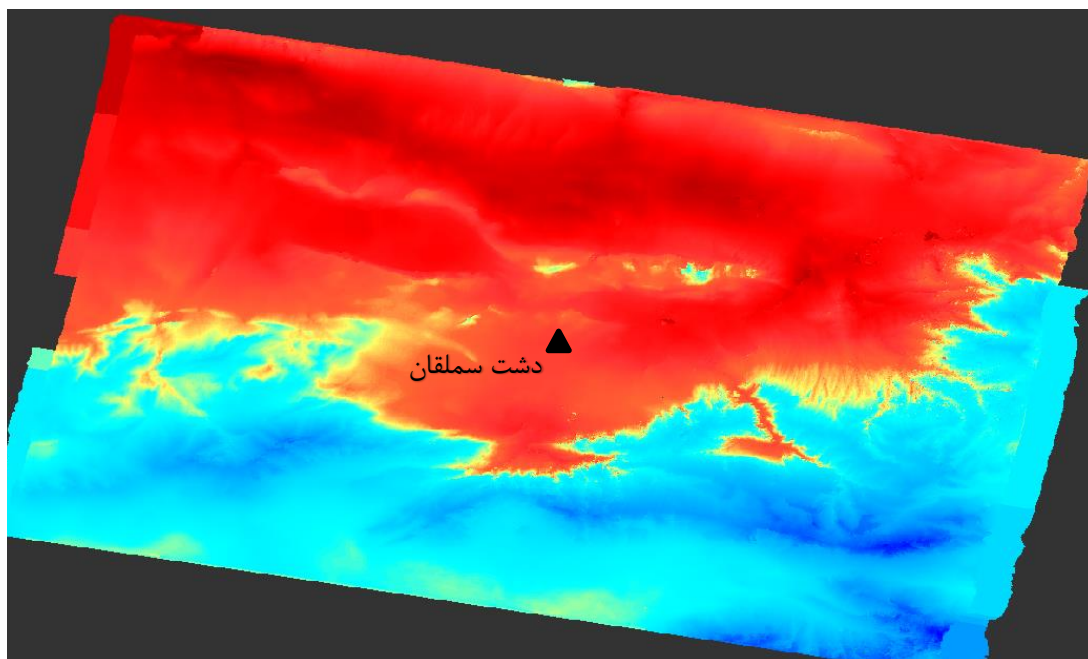
شکل ۴-۱۰. نقشه جابه‌جایی

۴-۲-۱۰- زمین مرجع کردن

به دلیل تفاوت توپوگرافی یک صحنه و کج شدگی ماهواره، ممکن است فاصله‌ها در تصویر SAR نسبت به حالت طبیعی کمی تحریف شوند. تصاویر SAR مستقیماً از منطقه NADIR زیر سنجنده به‌طور عمود بر زمین ثبت‌نشده و دارای کمی اعوجاج هستند. به‌منظور کاهش این اعوجاجات از تصحیح هندسی استفاده می‌شود تا هندسه تصویر ثبت‌شده تا حد ممکن به حالت زمینی خود نزدیک شود. نرم‌افزار SNAP با استفاده از یک نقشه ارتفاعی رقومی به‌عنوان یک مرجع برای استخراج اطلاعات موقعیت نقاط زمینی اطلاعات پیکسل‌ها را اصلاح می‌کند. در نتیجه این الگوریتم تصاویر SAR از حالت کشیدگی که به دلیل تفاوت در اندازه توان تفکیک در جهت آزیموت و رنج دارند به حالت صحیح زمینی با ابعاد یکسان و با سیستم مختصات WGS84 تصحیح خواهند شد. در این مرحله از نقشه رقومی ارتفاعی ۳۰ متری SRTM که به‌طور خودکار توسط نرم‌افزار دانلود می‌شود، استفاده شد. تصویر نهایی فرونشست زمین مرجع شده در شکل ۴-۱۱ نشان داده‌شده است. همان‌طور که نشان داده‌شده، پس از زمین مرجع نمودن تصویر، جهت آن تغییر کرده و در راستای شمال جغرافیایی قرار می‌گیرد.

Digital Elevation Model:	SRTM 1Sec HGT (Auto Download) ▾
DEM Resampling Method:	BILINEAR_INTERPOLATION ▾
Image Resampling Method:	BILINEAR_INTERPOLATION ▾
Source GR Pixel Spacings (az x rg):	0.0(m) x 0.0(m)
Pixel Spacing (m):	100
Pixel Spacing (deg):	100
Map Projection:	WGS84(DD)
☒ Mask out areas without elevation ☐ Output complex data	

(الف)

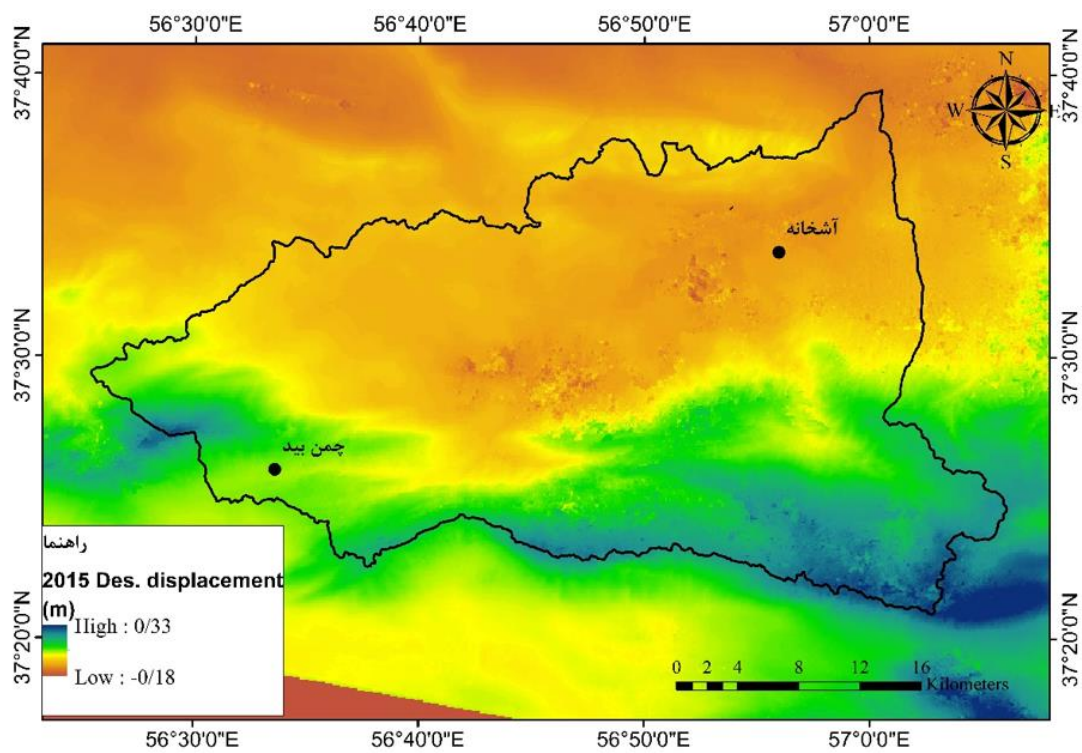


(ب)

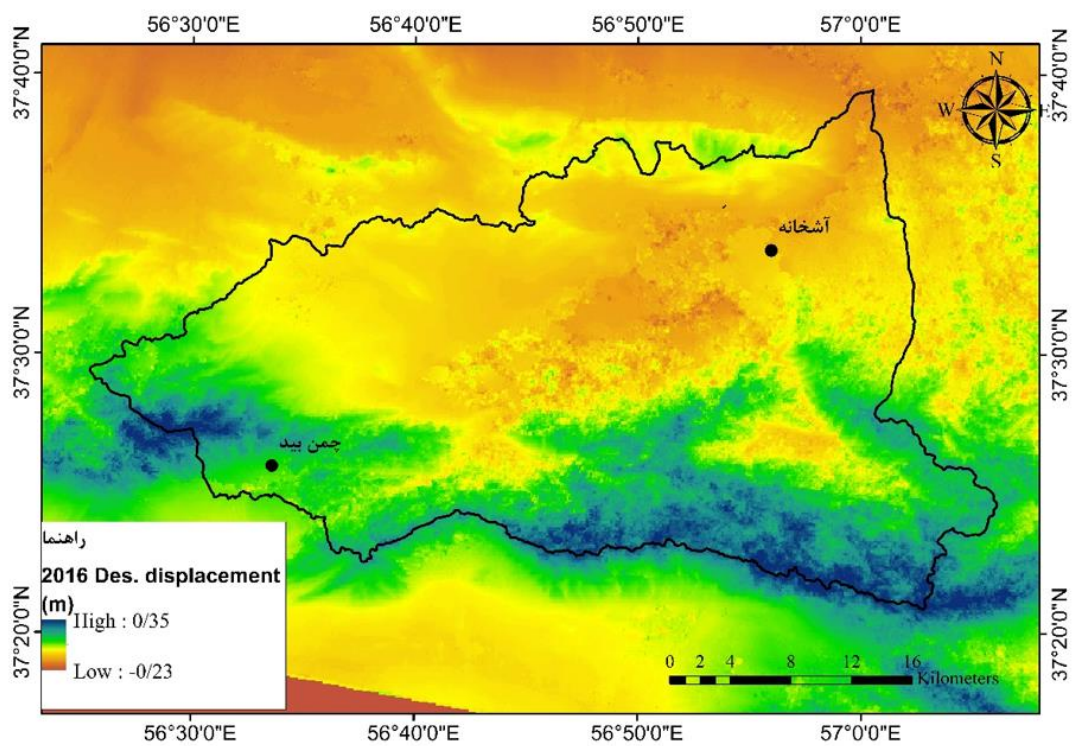
شکل ۴-۱۱. زمین مرجع نمودن نقشه جابه‌جایی، (الف) تنظیمات اعمال شده به نرم‌افزار SNAP و (ب) نقشه جابه‌جایی پس از انجام عملیات زمین مرجع نمودن

۴-۲-۱۲- تحلیل و بررسی نقشه‌های جابه‌جایی

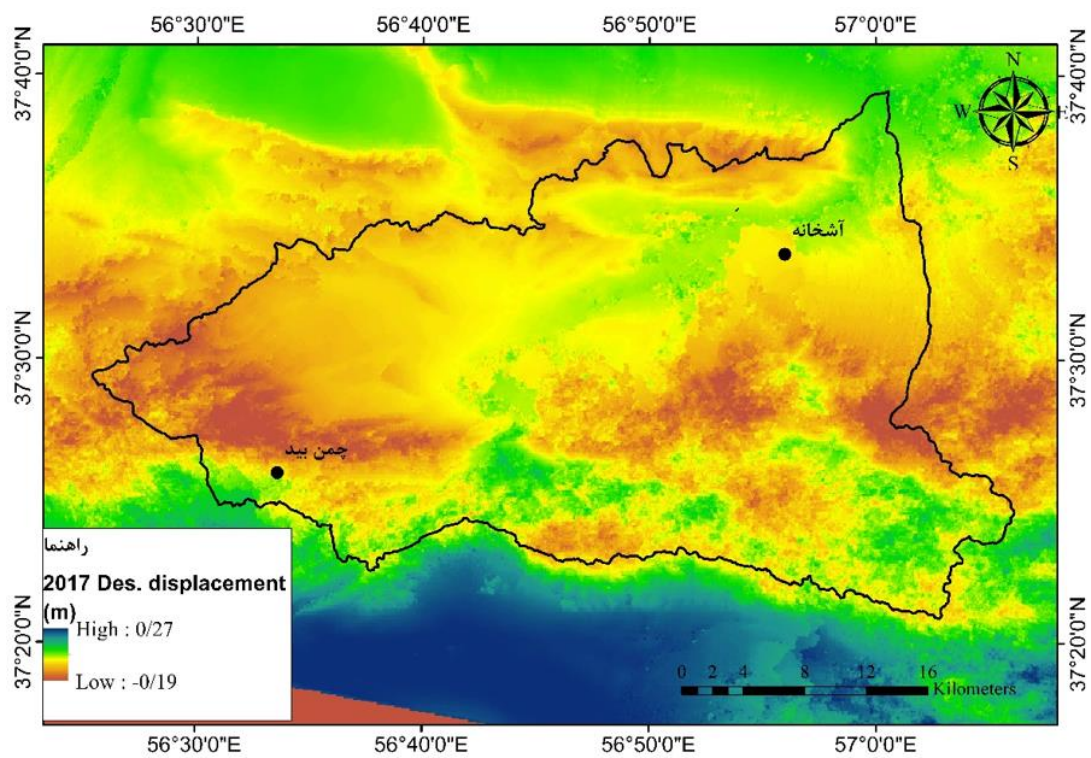
با اتمام روند محاسبه جابه‌جایی، می‌توان جابه‌جایی تجمعی برای هر سال را با استفاده از Bandmath و جمع نمودن نقشه‌های حاصله، محاسبه نمود. پس از آماده‌سازی تصاویر حاصل از پردازش‌های تداخل‌سنجی راداری، نتایج به‌منظور تهیه نقشه استاندارد و موقعیت‌یابی منطقه و سایر تحلیل‌ها به GIS منتقل می‌شوند. در ادامه نقشه‌های جابه‌جایی تجمعی برای داده‌های سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ در شکل ۴-۱۲ (الف-ه) آورده شده‌اند.



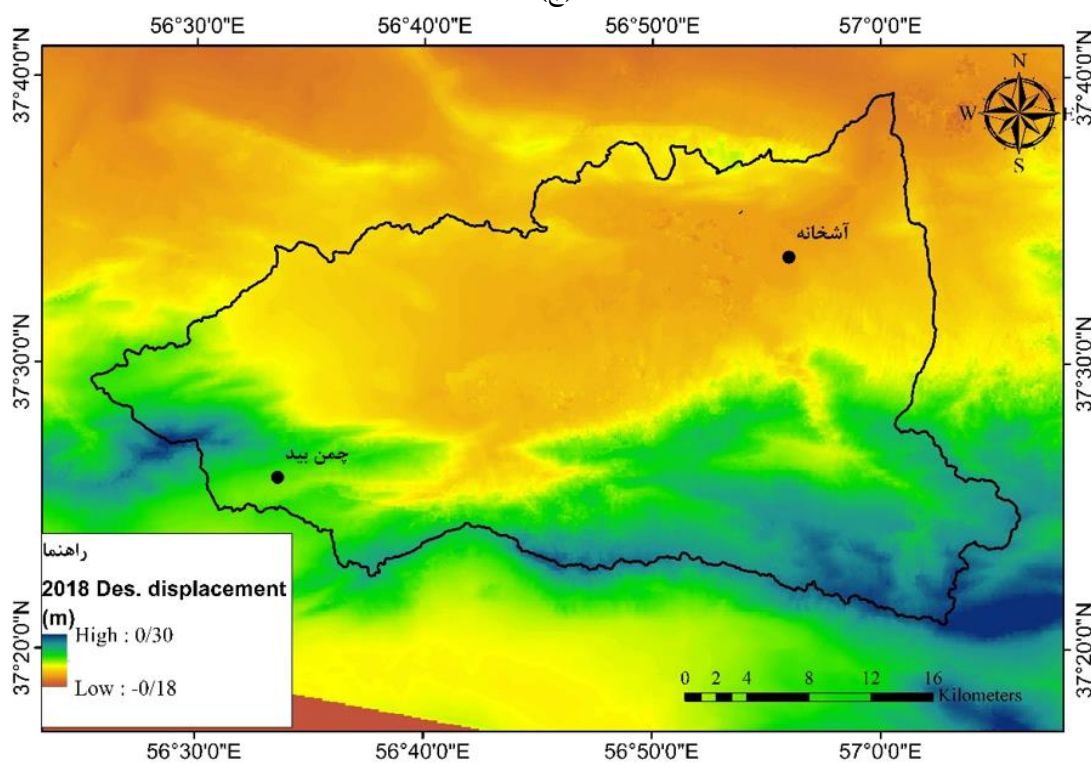
(الف)



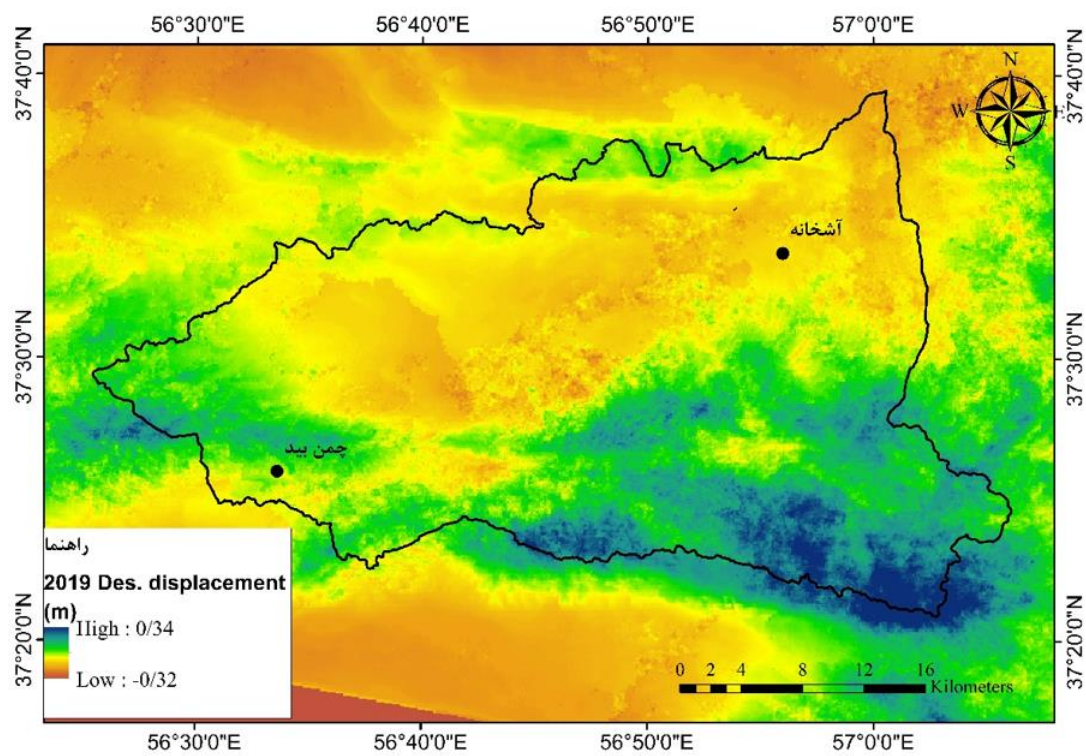
(ب)



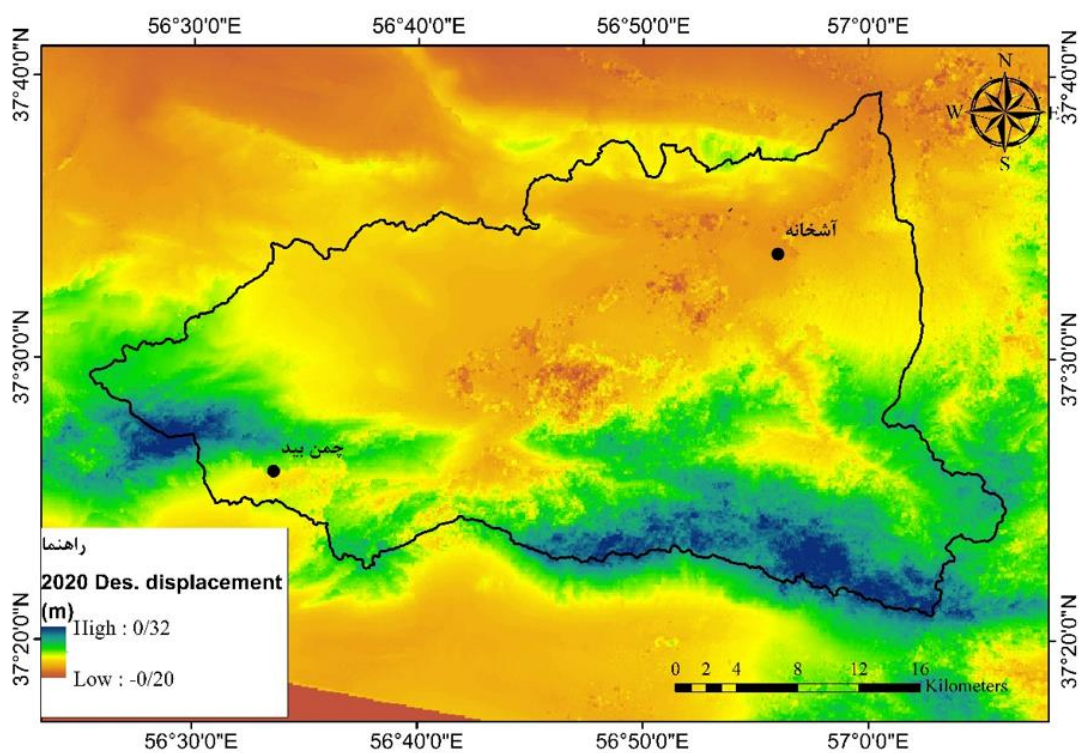
(ج)



(د)



(ه)



(و)

شکل ۴-۱۲. جابه‌جایی تجمعی تصاویر پایین گذر مربوط به سال‌های (الف) ۲۰۱۵، (ب) ۲۰۱۶،

(ج) ۲۰۱۷، (د) ۲۰۱۸، (ه) ۲۰۱۹ و (و) ۲۰۲۰

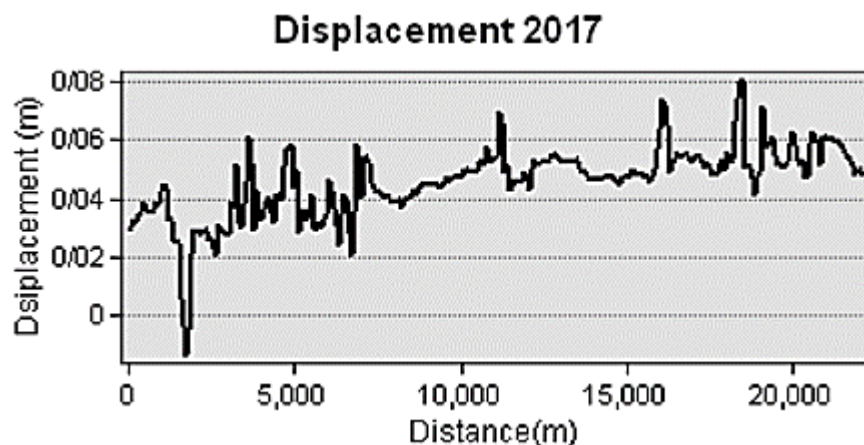
نتایج پردازش‌های DInSAR و بررسی نقشه تجمعی الگوی رفتاری فرونشست را در طی زمان بر روی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. فرونشست زمین در دشت سملقان بیشتر در بخش شمال و شمال غرب منطقه رخ داده است. در مطالعه پیشین نیز خسروپناه و همکاران (۱۳۹۰)، به این مسئله اشاره نمودند که شکاف‌های زمین در شمال غرب دشت ایجاد شده بوده و در حال حرکت به سمت شرق منطقه هستند [84]. به مرور زمان این رفتار تغییر کرده و فرونشست به سایر بخش‌های دشت نیز منتقل شده است. میزان بیشینه فرونشست در سال ۲۰۱۹ به بیشترین مقدار خود رسیده است. روند تغییرات سطح آب نیز نشان‌دهنده افت آب در این بازه زمانی بوده است.

بررسی نقشه فرونشست در منطقه در سال ۲۰۱۵ نشان‌دهنده فرونشست زمین در تمامی نقاط شمالی دشت سملقان است. در سال ۲۰۱۵ در جنوب و جنوب غرب منطقه فرونشستی مشاهده نشده است. به‌طور مثال در چمن بید بالاآمدگی سطح زمین مشاهده می‌گردد.

تصویر جابه‌جایی تجمعی سال ۲۰۱۶ همدوسی پایین‌تری نسبت به سال گذشته‌اش دارد، اما به‌خوبی نشان‌دهنده ادامه روند فرونشست زمین در بخش مرکزی دشت سملقان است، اما همان‌طور که نقشه فرونشست نشان می‌دهد، در مناطقی از شمال دشت، جنوب و جنوب غربی آن بالاآمدگی سطح زمین مشاهده می‌شود. افزایش میزان بیشینه فرونشست در سال ۲۰۱۶ می‌تواند علل مختلفی داشته باشد. با بررسی‌های بیشتر سوابق بارش به‌عنوان عاملی تعدیل‌کننده و دمای سال ذکر شده می‌توان علت آن را بهتر توجیه نمود. بررسی داده‌های بارش سینوپتیک تهیه‌شده از سایت سازمان هواشناسی نشان داده است در سال ۲۰۱۶ بارش بسیار کمتر از سال ۲۰۱۵ بوده است. بارش سال ۲۰۱۵ برابر با ۲۴۸ میلی‌متر و در سال ۲۰۱۶، ۱۲۰ میلی‌متر ثبت شده است. نمودار روند تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان از افت آب در منطقه دارد.

در سال ۲۰۱۷، الگوی فرونشست زمین کمی تغییر کرده و تقریباً در تمام دشت گسترده شده است.

در شمال آبخانه، سطح زمین در راستای شمال شرق-جنوب غرب کمی بالاآمدگی داشته است. گراف جابه‌جایی زمین در راستای ذکرشده، بر موقعیت آبخوان که مطابق بر خط ۱ در شکل ۴-۲۵ است در شکل ۴-۱۳ قابل مشاهده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، در راستای موردنظر تقریباً در تمام نقاط بالاآمدگی زمین رخ داده است. سایر پلات‌های جابه‌جایی برای تمام سال‌ها در پیوست قرار داده شده‌اند.

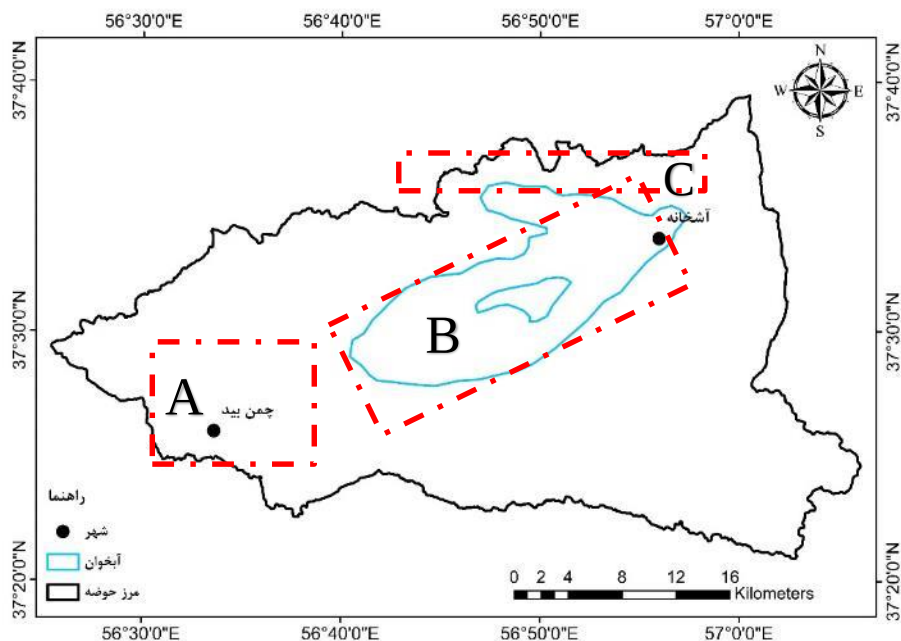


شکل ۴-۱۳. گراف تغییرات سطح زمین در سال ۲۰۱۷ در راستای شمال شرق-جنوب غرب آبخوان سملقان

در سال ۲۰۱۸، مجدداً الگوی پیشین فرونشست در دشت سملقان تکرار شده و به سمت مرکز دشت کشیده شده است، همان گونه که در شکل ۴-۱۲ (د) دیده می‌شود، نقاطی که در جنوب دشت درگیر فرونشست بوده‌اند مجدداً با بالاآمدگی مواجه شده‌اند و در این بخش‌ها فرونشستی رخ نداده است. بیشینه فرونشست تجمعی تصاویر در این سال، برابر با ۱۸ سانتی‌متر است که نسبت به سال گذشته یک سانتی‌متر افزایش یافته است.

در سال ۲۰۱۹ مجدداً در بخش‌های شمالی آبخوان کمی بالاآمدگی مشاهده می‌گردد (شکل ۴-۱۴، بخش (C)). در این سال در ناحیه چمن بید (شکل ۴-۱۴، بخش (A)) فرونشست رخ داده است که در تصاویر قبلی فرونشستی برای آن ثبت نشده بود. این الگو در شکل ۴-۱۶ نیز قابل مشاهده است. همچنین، در شمال دشت و مناطق مرکزی دشت سملقان (شکل ۴-۱۴، بخش (B)) که با جنوب آبخوان منطبق

است کمی بالآمدگی رفتار زمین رؤیت شده است. در سال ۲۰۱۹ بیشترین میزان فرونشست در دشت سملقان اندازه‌گیری شده است. مناطقی که در طول سال‌های مورد مطالعه با نوسانات سطح زمین مواجه بوده‌اند در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده‌اند.

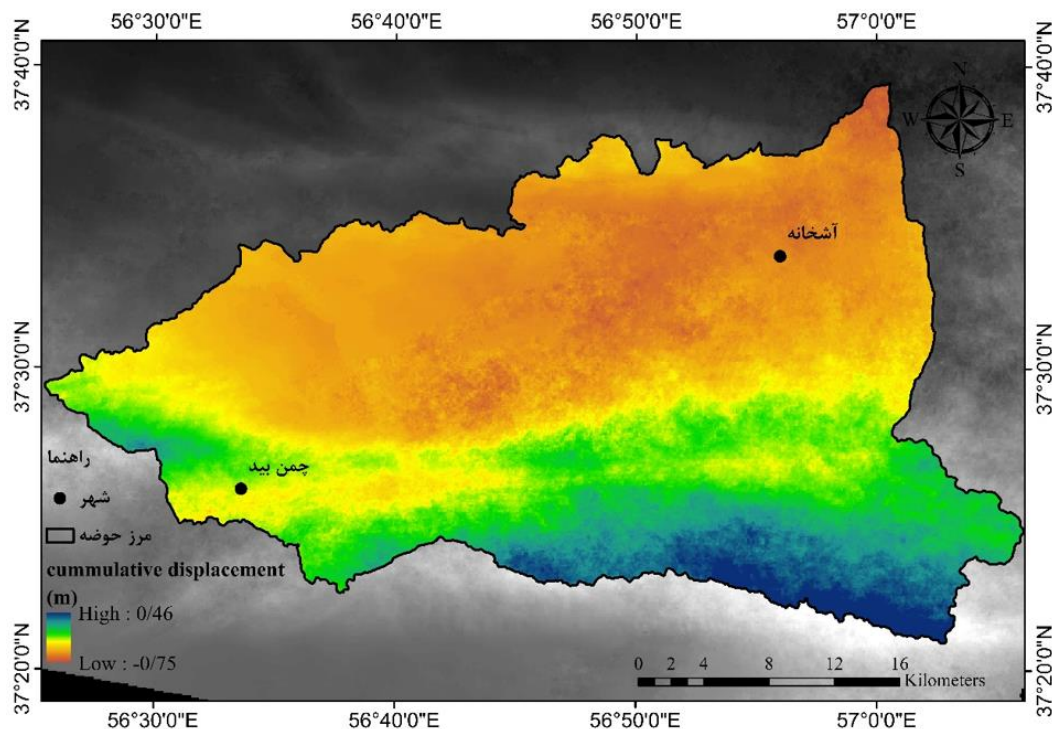


شکل ۴-۱۴. موقعیت مناطقی که در آن‌ها فرونشست و بالآمدگی در طول زمان رؤیت شده

آخرین تصویر تولیدشده، تصویر سال ۲۰۲۰ می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، فرونشست از سمت مرز جنوبی حوضه به منطقه مطالعاتی وارد شده و آن را تحت تأثیر قرار داده است. مجدداً مرز شمالی آبخوان که در سال ۲۰۱۹ با بالآمدگی مواجه شده بود در سال ۲۰۲۰ درگیر فرونشست شده است. بررسی نقشه‌ها نشان‌دهنده تکرار وقوع پدیده فرونشست در شمال و شمال غرب دشت سملقان، بخشی مرکزی آن که آبخوان در آنجا وجود دارد و بخش غربی آن در نزدیکی چمن بید در سال‌های آخر است. پیشروی افت زمین غرب به سمت چمن بید است که در صورت عدم مدیریت صحیح منجر به خساراتی در مناطق مسکونی خواهد شد.

به‌منظور دریافت دید کلی‌تر نسبت به حرکات سطح منطقه، نقشه جابه‌جایی تجمعی کل تصاویر برای منطقه تهیه گردید (شکل ۴-۱۵). نقشه جابه‌جایی تجمعی از تاریخ ۳ اکتبر ۲۰۱۴ تا ۷ اکتبر ۲۰۲۰

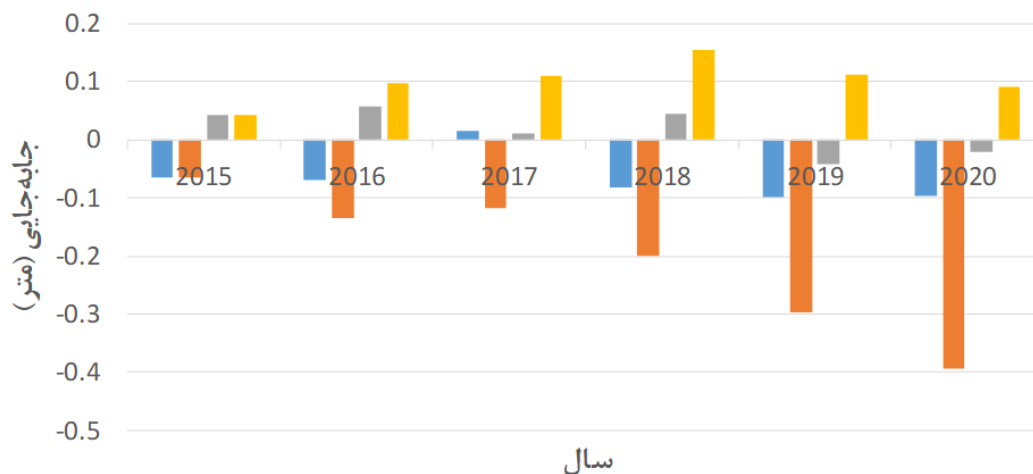
نشان از فرونشست حداکثر ۷۵ سانتی‌متری در منطقه دارد. هنگامی که در منطقه‌ای فرونشست رخ می‌دهد، بالاآمدگی نیز در مناطقی قابل‌رؤیت است. نرخ فرونشست در دشت سملقان حداکثر ۱۲٫۵ سانتی‌متر در سال و ۰٫۳۴ میلی‌متر در روز برآورد می‌شود. این نرخ برای بالاآمدگی به میزان ۷٫۶ سانتی‌متر در سال ۰٫۲ میلی‌متر در روز در بیشترین حالت خود است.



شکل ۴-۱۵. نقشه جابه‌جایی کل دشت سملقان در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۴

با به دنبال نمودن روند تغییرات سطح زمین، می‌توان بالاآمدگی سطح زمین را پس از فرونشست آن در بعضی نقاط مشاهده نمود. به‌طور مثال اطراف چمن بید، آشخانه، برخی قسمت‌های جنوبی دشت و حتی شمال دشت در سال ۲۰۱۶ سطح زمین بعد از فرونشست پیشین آن بالا آماده است. همچنین در برخی مناطقی که در سال ۲۰۱۷ درگیر فرونشست بوده‌اند در سال‌های بعدی بالاآمدگی رؤیت شده است (شکل ۴-۱۶)، به همین ترتیب در مناطقی که بالاآمدگی تشخیص داده‌شده در سال‌های بعدی شاهد فرونشست هستیم. در نتیجه احتمال الاستیک بودن رفتار زمین بالا است که نیاز به بررسی‌های

بیشتر دارد. به‌طور مثال، جابه‌جایی شهرهای آشخانه و چمن بید که دو شهر شاخص در دشت سملقان هستند استخراج‌شده و در شکل ۴-۱۶ به‌صورت جابه‌جایی سالانه و تجمعی ترسیم‌شده‌اند. همان‌گونه که در این نمودار رؤیت می‌گردد، در شهر آشخانه پس از دو سال فرونشست متوالی، در سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ بالاآمدگی سطح زمین مشاهده‌شده و پس از آن مجدداً دو سال فرونشست در سطح زمین رخ داده است، به‌هرحال تأثیر فرونشست بیشتر بوده و همان‌گونه که تغییرات تجمعی در این نقطه مشاهده می‌گردد فرونشست بر نقطه موردبررسی غالب بوده و ۳۹ سانتی‌متر فرونشست در آن رخ داده است. در شهر چمن بید این شرایط متفاوت است، از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۱۸ در این نقطه بالاآمدگی برداشت‌شده است، درحالی‌که در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ رفتار زمین تغییر کرده و شاهد فرونشست هستیم.



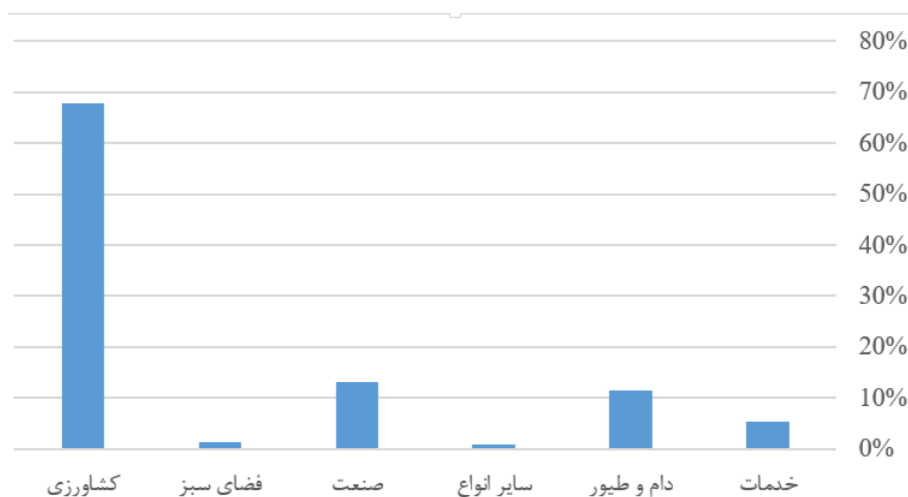
تغییرات چمن بید تجمعی تغییرات ارتفاع چمن بید تغییرات آشخانه تجمعی تغییرات ارتفاع آشخانه

شکل ۴-۱۶. نمودار تغییرات ارتفاعی زمین در شهرهای آشخانه و چمن بید به‌صورت سالانه و تجمعی

فرونشست در تمام سال‌ها در بخش آبخوان دشت سملقان وجود داشته است که نشان از ارتباط مستقیم تأثیر افت آب‌های زیرزمینی برنشست زمین دارد. نقشه فرونشست تجمعی، نشان‌دهنده وقوع این پدیده در مناطق مسکونی (شهرهای آشخانه و چمن بید) و نشست در مناطق کشاورزی (مناطق میانی دشت) توسعه‌یافته است.

۴-۳- بررسی آب‌های زیرزمینی

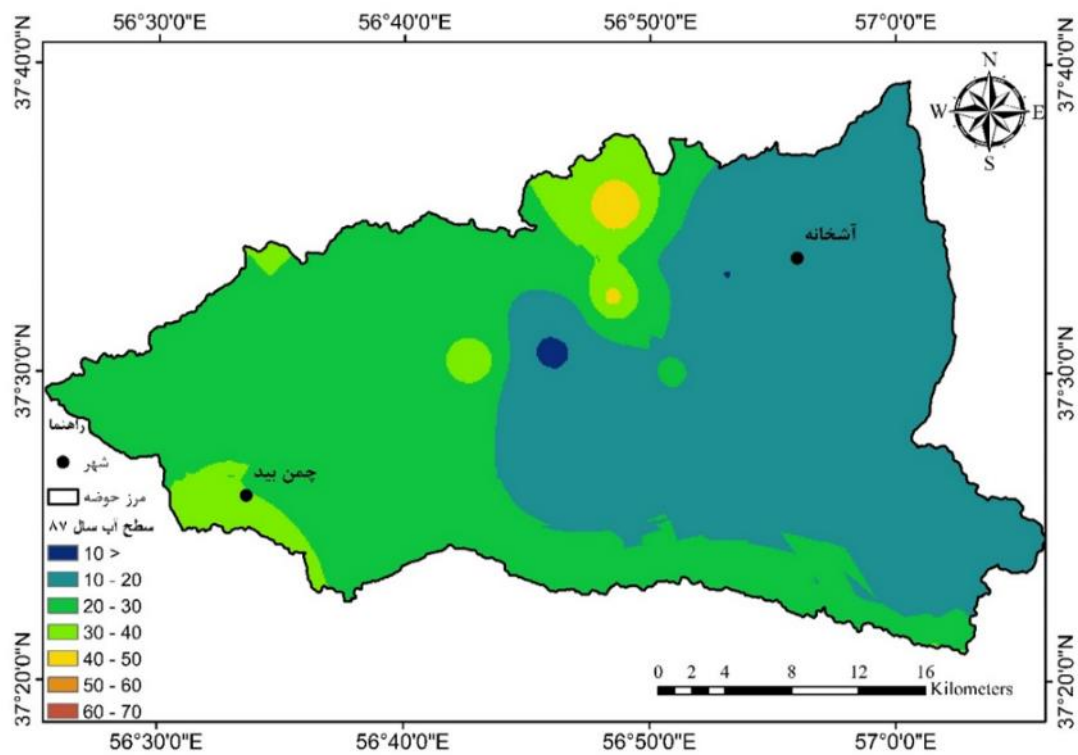
به‌منظور انجام این پژوهش، آمار ۱۷ چاه مشاهده‌ای در بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۸۷-۱۳۹۷) در دو دوره بررسی شد. اولین دوره موردبررسی دوره ۱۰ ساله به‌منظور بهبود ترسیم خط روند و دید کلی و بهتر از تغییرات سطح آب زیرزمینی و دومین دوره موردبررسی بازه ۱۳۹۳-۱۳۹۷ که در آن داده‌های ماهواره‌ای موجود بودند، در نظر گرفته شدند. در ابتدا داده‌های آماری جمع‌آوری و مرتب شدند، سپس روند تغییرات سطح آب هر چاه و روند تغییرات میانگین سطح آب در دشت موردبررسی قرار گرفته و نمودار آن‌ها ترسیم شد. پس از آن داده‌ها به Arcmap وارد شده و با استفاده از روش درون‌یابی نقشه‌های هم‌سطح و پهنه‌بندی افت و سپس جهت آب زیرزمینی تهیه گردید. با توجه به داده‌های تهیه‌شده از آب منطقه‌ای خراسان شمالی، درصد مصارف مختلف آب زیرزمینی در دشت سملقان در شکل ۴-۱۷ نشان داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین حجم استخراج آب در این منطقه به‌منظور مصارف کشاورزی است.



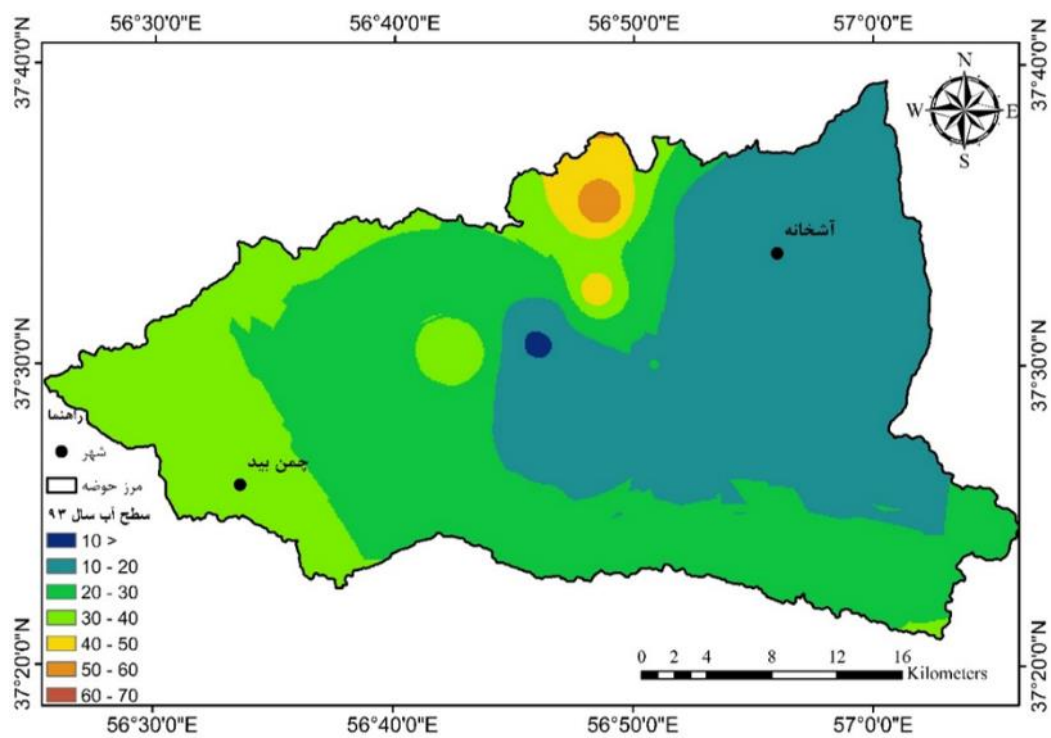
شکل ۴-۱۷. درصد مصارف مختلف آب زیرزمینی در دشت سملقان

۴-۳-۱- نقشه‌های هم‌سطح آب زیرزمینی

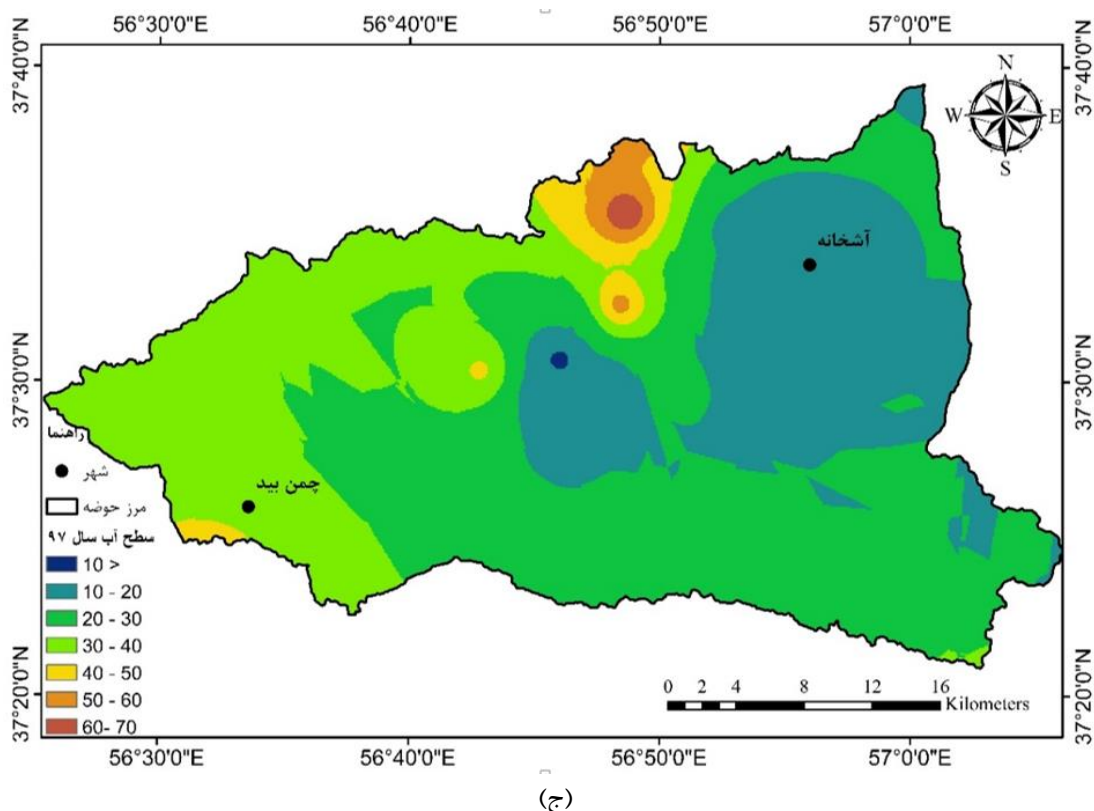
در این پژوهش، به‌منظور تهیه نقشه‌های هم‌پتانسیل آب‌های زیرزمینی از روش IDW با توان ۲ استفاده گردید. این روش یکی از روش‌های معمول و پرکاربرد درون‌یابی است. در علوم مربوط به زمین مانند زمین‌شناسی و جغرافیا، برای درون‌یابی از توابع ریاضی و آماری بهره‌گیری می‌شود. در این روش، نقاط مجهول بر اساس خودهمبستگی بین نقاط معلوم و ساختار فضایی آن‌ها پیش‌بینی می‌شوند. نرم‌افزار GIS سطح یک رستر را با استفاده از روش وزن دهی معکوس فاصله نقاط درون‌یابی می‌کند. در این روش برای یافتن مقادیر سطح آب در هر نقطه مجهول از مقدار این پارامتر در نقاط مختلف استفاده می‌شود؛ بدین ترتیب که به هر یک از نقاط معلوم، وزنی بر اساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول وجود دارد که نشان می‌دهد میزان تشابه سطح آب نقطه مجهول با هر یک از نقاط معلوم چقدر است. واضح است که هرچه نقاط نزدیک‌تر تشابه بیشتر و نقاط دورتر تشابه کمتری با مقدار پارامتر در نقطه مورد مراجعه دارند، این وزن توسط توان وزن دهی کنترل می‌شود. توان‌های کوچک‌تر در این روش وزن‌ها را به‌طور یکنواختی بین نقاط همسایه توزیع می‌کنند. نقشه‌های هم‌سطح آب زیرزمینی ترسیم‌شده برای سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۳ و ۱۳۹۷ در شکل ۴-۱۸ (الف-ج) قابل مشاهده هستند. با توجه به این نقشه‌ها که در آن‌ها بازه‌های مشابه انتخاب‌شده است، روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و افت آن در بیشتر مناطق دشت به‌وضوح قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)

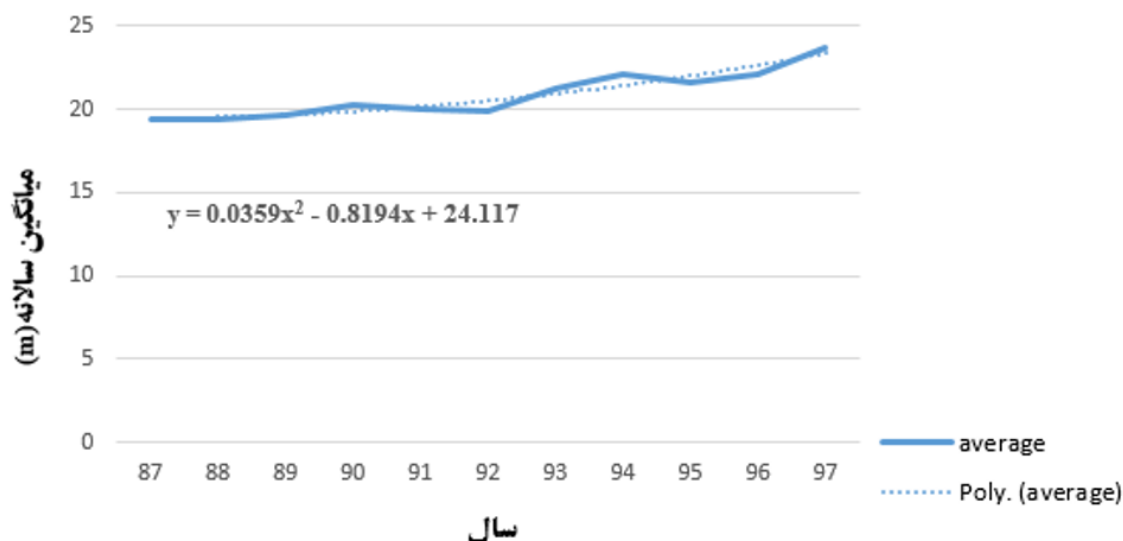


شکل ۴-۱۸. نقشه هم‌سطح آب‌های زیرزمینی دشت سملقان در سال‌های، (الف) ۱۳۸۷، (ب) ۱۳۹۳ و

(ج) ۱۳۹۷

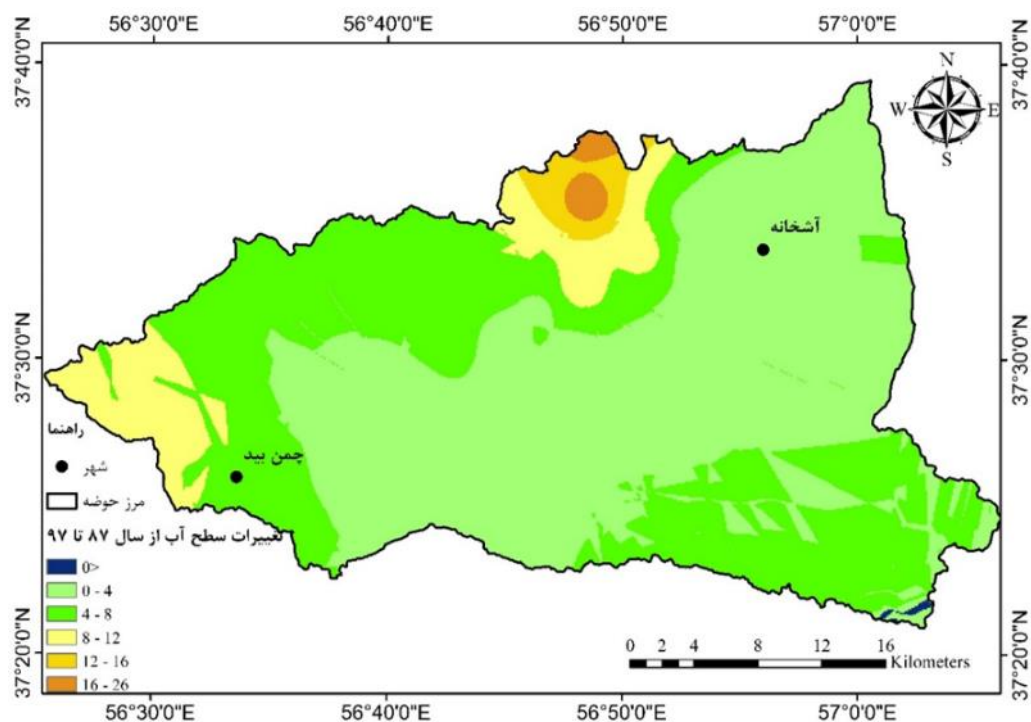
۴-۳-۲- تغییرات سطح آب زیرزمینی

با توجه به در دسترس نبودن داده‌های آماری، روند تغییرات میانگین سطح آب زیرزمینی در بازه ۱۰ ساله ترسیم شد. پس از برازش انواع مختلف خطوط، بهترین برازش مربوط به نمودار درجه ۲ تشخیص داده شد، این برازش در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. تغییرات سطح آب در این شکل قابل مشاهده است. میانگین سطح آب در بازه ۱۰ ساله ۴,۷ متر تفاوت داشته که با توجه به آن می‌توان گفت در این دشت سالانه افت تقریباً ۰,۴۷ متری سطح آب رخ می‌دهد.

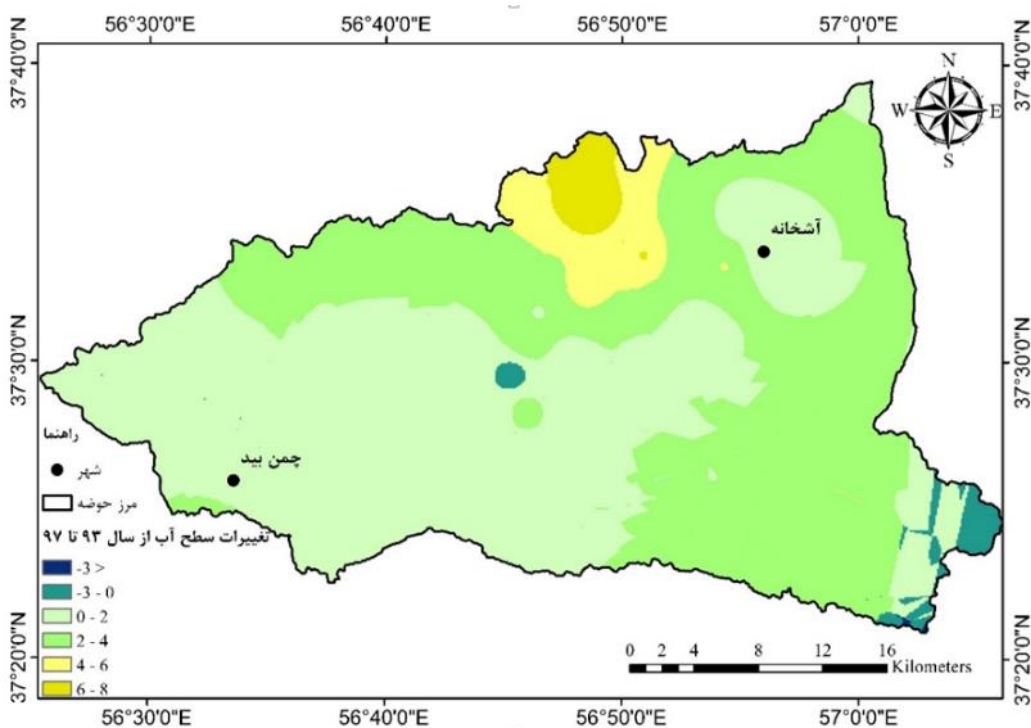


شکل ۴-۱۹. روند تغییرات میانگین سطح آب‌های زیرزمینی در بازه ۱۰ ساله

با استفاده از معادله تولیدشده، میانگین سطح آب در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ در جدول ۳-۴ محاسبه شده است. نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از ابزار Raster Calculator ترسیم شده که اختلاف مقادیر سطح آب در دولایه را محاسبه نموده، نتایج را در نقشه‌ای جدید ترسیم می‌نماید. نتایج حاصله در شکل‌های (الف) و (ب) ۴-۲۰ نشان داده شده‌اند. مقادیر منفی در این تصاویر نشان‌دهنده بالا آمدن سطح آب می‌باشند. به‌طور مثال در چاه W11 سطح آب نسبت به سال ۱۳۹۳ کمی بالا آمده است که در نقشه نیز قابل مشاهده است.



(الف)



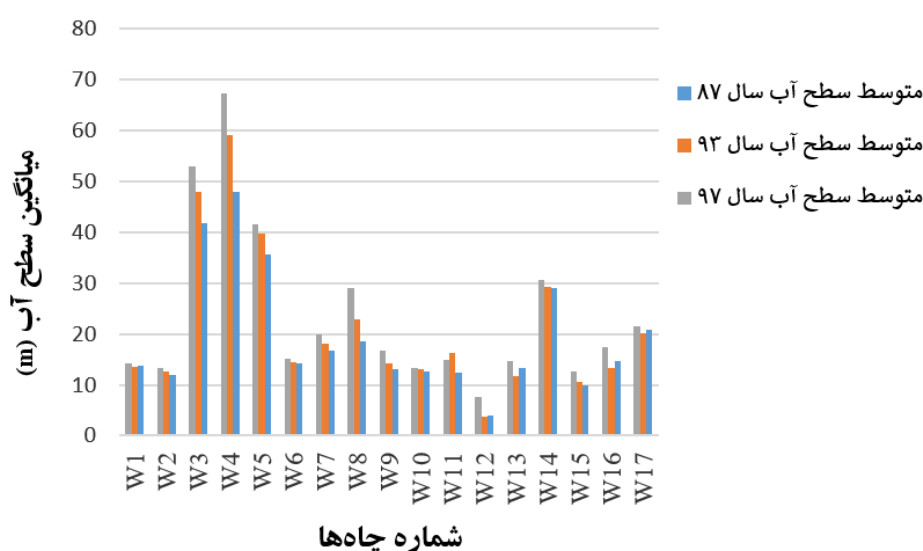
(ب)

شکل ۴-۲۰. (الف) افت سطح آب زیرزمینی از سال ۸۷ تا ۹۷، (ب) افت سطح آب زیرزمینی از سال ۹۳ تا ۹۷ در

دشت سملقان

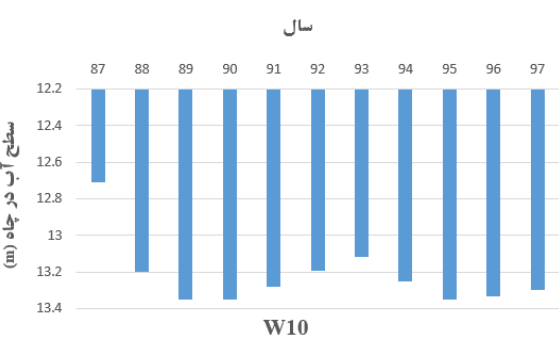
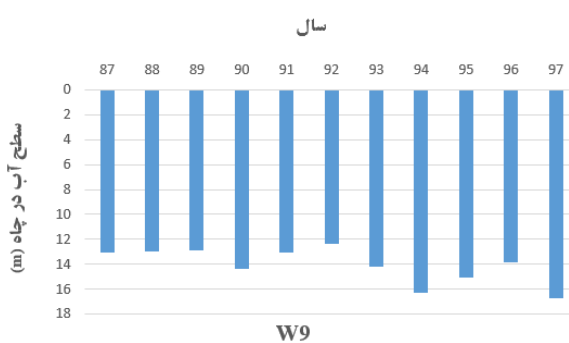
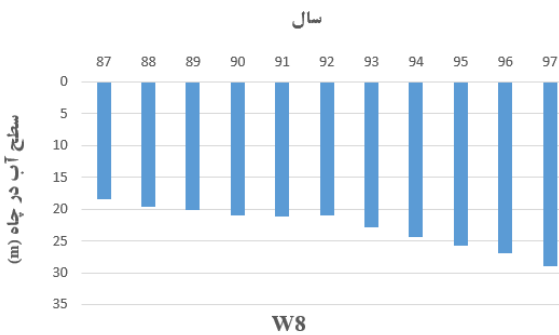
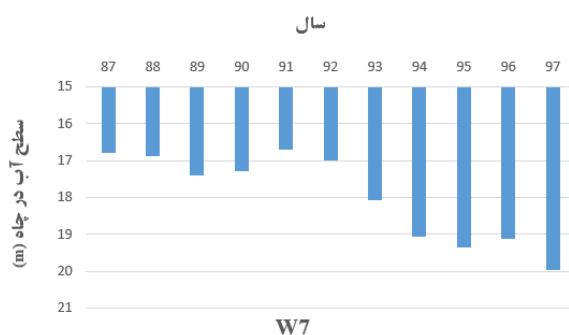
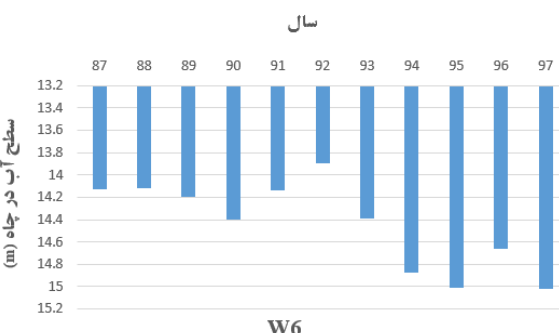
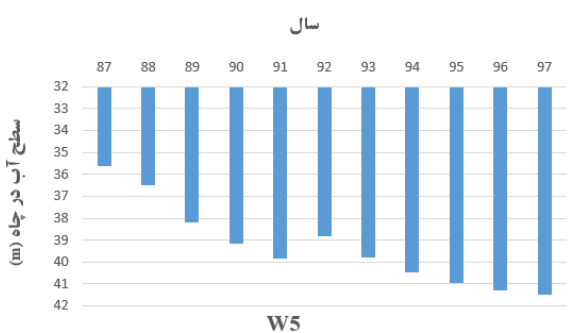
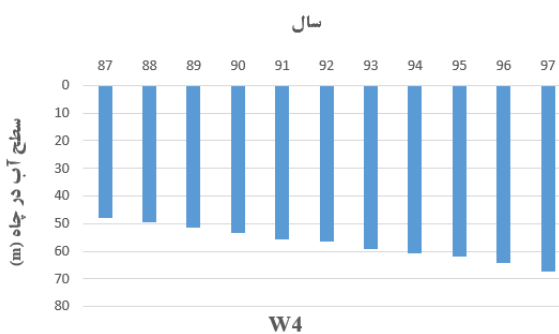
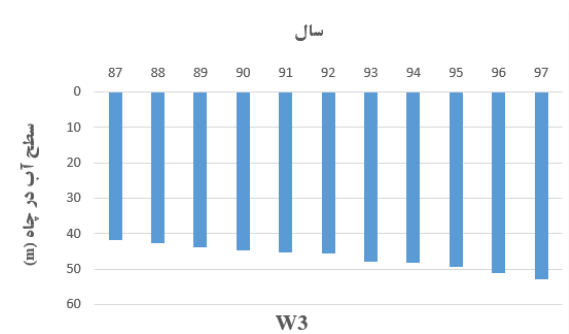
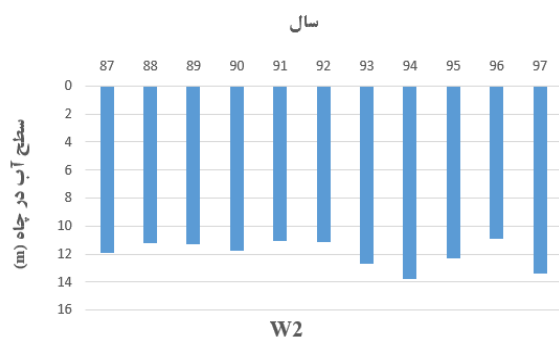
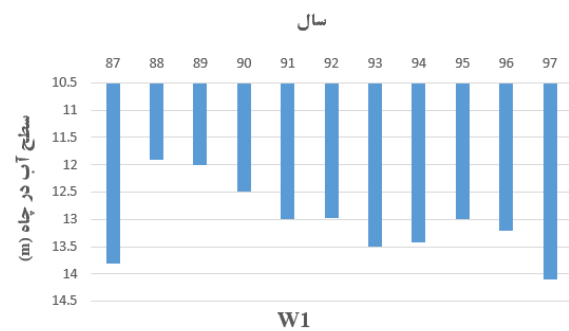
نتایج نشان می‌دهد که در بازه ۱۳۸۷-۱۳۹۷ تقریباً تمام منطقه به‌جز منطقه کوچکی که قابل چشم‌پوشی است درگیر کاهش سطح آب زیرزمینی است. نمودار متوسط سطح آب تمامی چاه‌های پیزومتری برای سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۳ و ۱۳۹۷ به‌صورت میله‌ای در شکل ۴-۲۱ قابل مشاهده است. با توجه به نمودار ترسیم‌شده بیشترین تغییرات در بازه ۴ ساله، مربوط به چاه W4 و کمترین تغییرات مربوط به چاه W11 است. به همین ترتیب در بازه ۱۰ ساله، بیشترین تغییرات مربوط به چاه W4 و کمترین تغییرات مربوط به چاه W1 است.

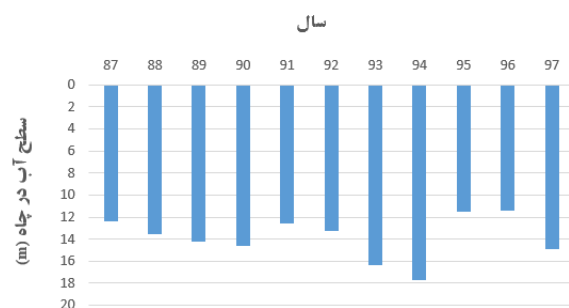
در شکل ۴-۲۲ نمودارهای میله‌ای تمام چاه‌های پیزومتری در بازه ۱۰ ساله ترسیم شده‌اند. در تمام چاه‌ها علی‌رغم نوسانات سطح آب زیرزمینی سطح آب به‌صورت عمومی افت داشته است.



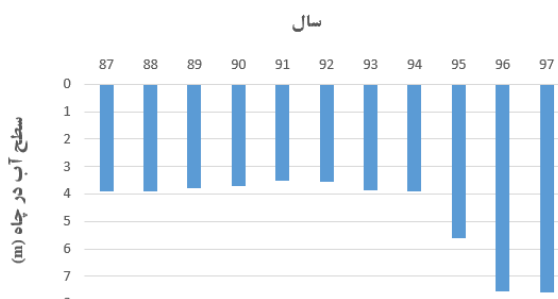
شکل ۴-۲۱. نمودار میله‌ای سطح آب زیرزمینی در چاه‌های پیزومتری منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۸۷،

۱۳۹۳، ۱۳۹۷

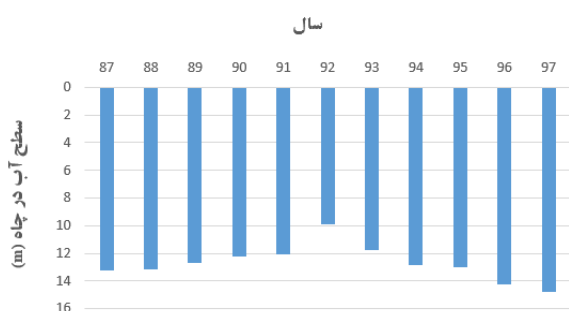




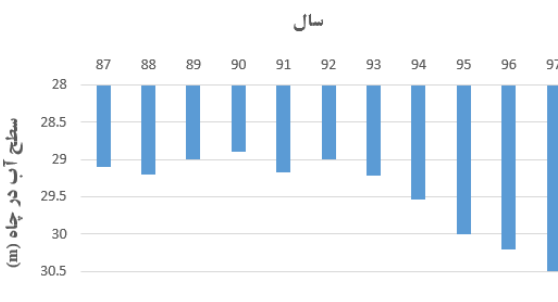
W11



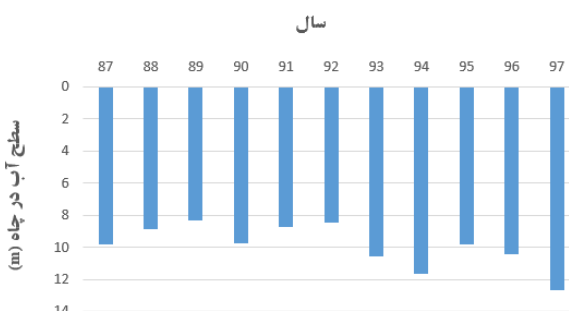
W12



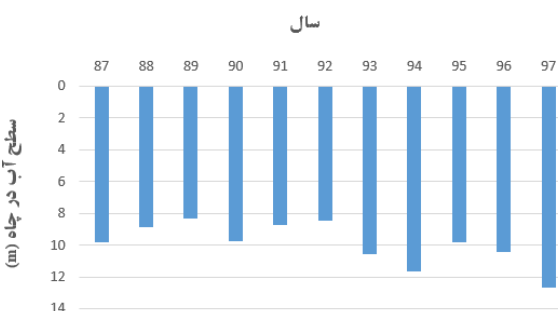
W13



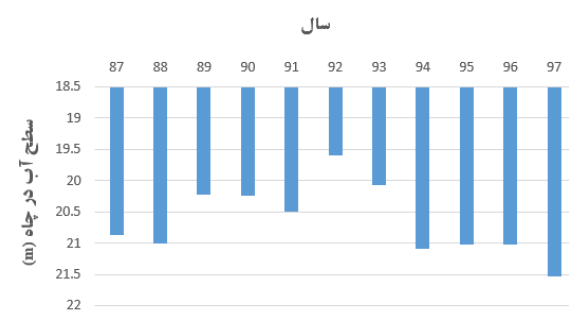
W14



W15



W16



W17

شکل ۲۲-۴. سطح آب ۱۷ چاه مشاهداتی نسبت به سطح

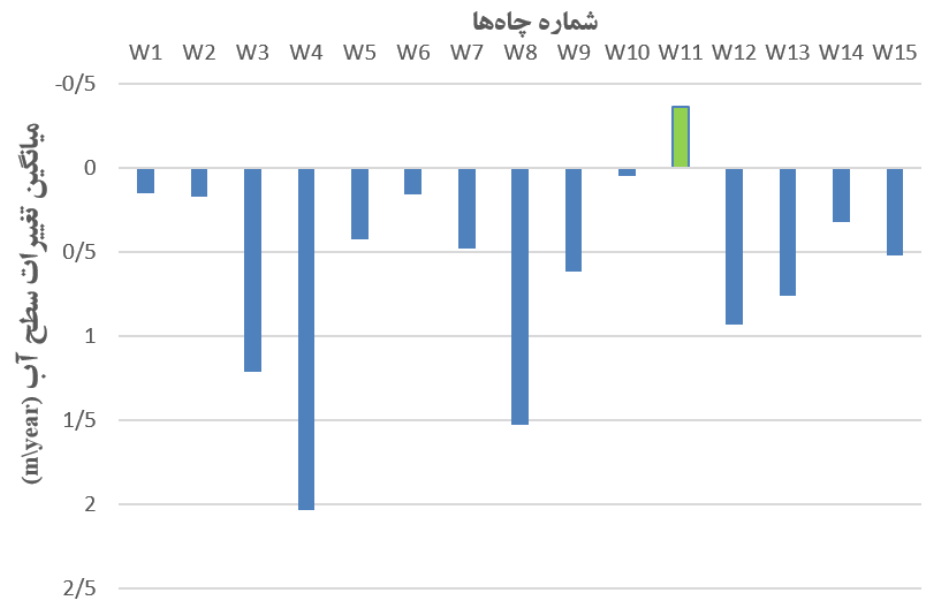
زمین در بازه زمانی ۱۳۸۷-۱۳۹۷

میانگین تغییرات سطح آب در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۹۷ برای چاه‌های پیزومتری منطقه، به صورت

میله‌ای در شکل ۲۳-۴ ترسیم شده‌اند. با توجه به این نمودار، بیشترین تغییرات مربوط به چاه W4 با

۲,۰۳ متر بر سال است که با توجه به شکل ۲۲-۴ از ۵۹ متر در سال ۱۳۹۳ به ۶۷ متر در سال ۱۳۹۷

رسیده است. پس از آن چاه‌های W8 و W16 نیز میانگین افت بالایی داشته‌اند. کمترین افت مربوط به چاه W10 می‌باشد. بررسی نمودارهای میله‌ای نشان از رفتار سینوسی سطح آب در این چاه دارد. در چاه W11 سالانه به میزان ۰,۳۶ متر بر سال بالآمدگی سطح آب مشاهده شده است. این چاه در طی بازه مطالعاتی نوسانات زیادی داشته است.



شکل ۴-۲۳. متوسط افت سطح آب بر اساس متر بر سال برای بازه ۹۳-۹۷

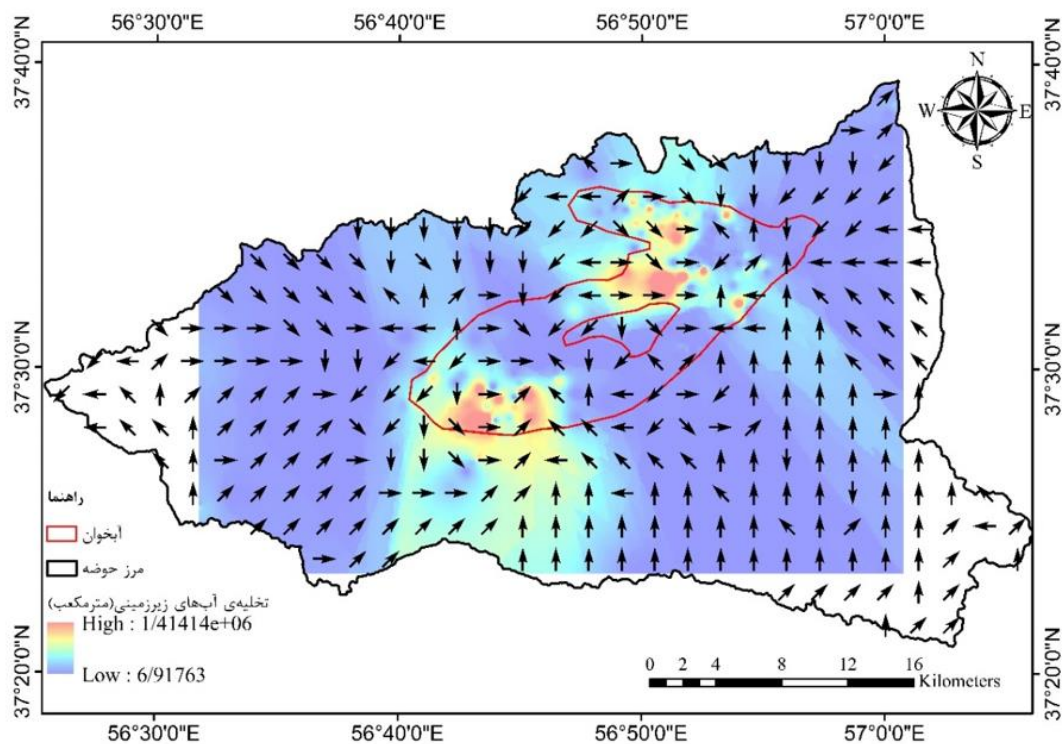
جدول ۴-۳. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و برازش داده‌های ۲ سال آخر

year	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
aver age	19/4	19/4	19/6	20/2	19/9	19/8	21/2	22/1	21/6	22/1	23/6	24/1	24/9

۴-۳-۳- نقشه جهت آب زیرزمینی

مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی از اهمیت شایانی در مطالعات منابع آب برخوردار است. به منظور تهیه نقشه جهت آب‌های زیرزمینی، از GIS استفاده شد. نقشه جهت آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های

ارتفاع سطح آب قابل ترسیم است. جریان آب زیرزمینی معمولاً به صورت یکنواخت و ماندگار است، به همین دلیل از داده‌های ارتفاع سطح آب در سال ۱۳۹۷ که آخرین داده آماری موجود در مطالعه حاضر بود، استفاده شد. پس از ترسیم نقشه سطح آب درون‌یابی شده، با استفاده از گزینه Flow Direction در ابزار Hydrology سیستم اطلاعات جغرافیایی، جهت جریان ترسیم گردید و پس از آن نقشه حاصله با استفاده از Resample به اندازه پیکسل‌هایی با اندازه تعریف‌شده به نرم‌افزار تبدیل شد و سپس به منظور کارآمد نمودن نقشه جهت و قابل فهم بودن آن در یک نگاه، به ازای هر پیکسل یک نقطه به عنوان نماینده تعریف شد. با استفاده از مقدار تعریف‌شده برای هر نقطه، جهت جریان در آن نقطه ترسیم گردید. نقشه حاصله با داده‌های ارتفاعی منطقه و جهت شیب مقایسه و صحت سنجی گردید، همچنین با توجه به نقشه تخلیه از آب‌های زیرزمینی دشت، جهت آب زیرزمینی درست ترسیم‌شده است. شکل ۴-۲۴ نمایانگر جهت حرکت آب‌های زیرزمینی در دشت سملقان است. از این نقشه به منظور بررسی، کنترل و امکان احیا و تزریق سفره استفاده خواهد شد. با بررسی نقشه جهت جریان با تخلیه چاه‌ها به وضوح مشخص است که جهت جریان به سمت مراکزی است که تخلیه در آن‌ها بیشتر است. این مسئله با توجه به این امر که تخلیه، موجب افت سطح آب در نقطه برداشت و در نتیجه افزایش ارتفاع مخروط افت گردیده، اختلاف هد جریان را به سمت میله چاه هدایت می‌نماید امری قابل توجیه است. همان گونه که در شکل ۴-۲۴ مشاهده می‌گردد، آب‌های زیرزمینی در دشت سملقان از اطراف به سمت مرکز منطقه تغذیه‌شده و با حرکت به سمت آبخوان جهت جریان به سمت نقاط تخلیه که چاه‌های بهره‌برداری هستند تغییر می‌نماید. در صورت نفوذ آلودگی نیز از این نقشه می‌توان به منظور حفاظت از چاه‌ها استفاده نمود که از حیطة این بحث خارج است.



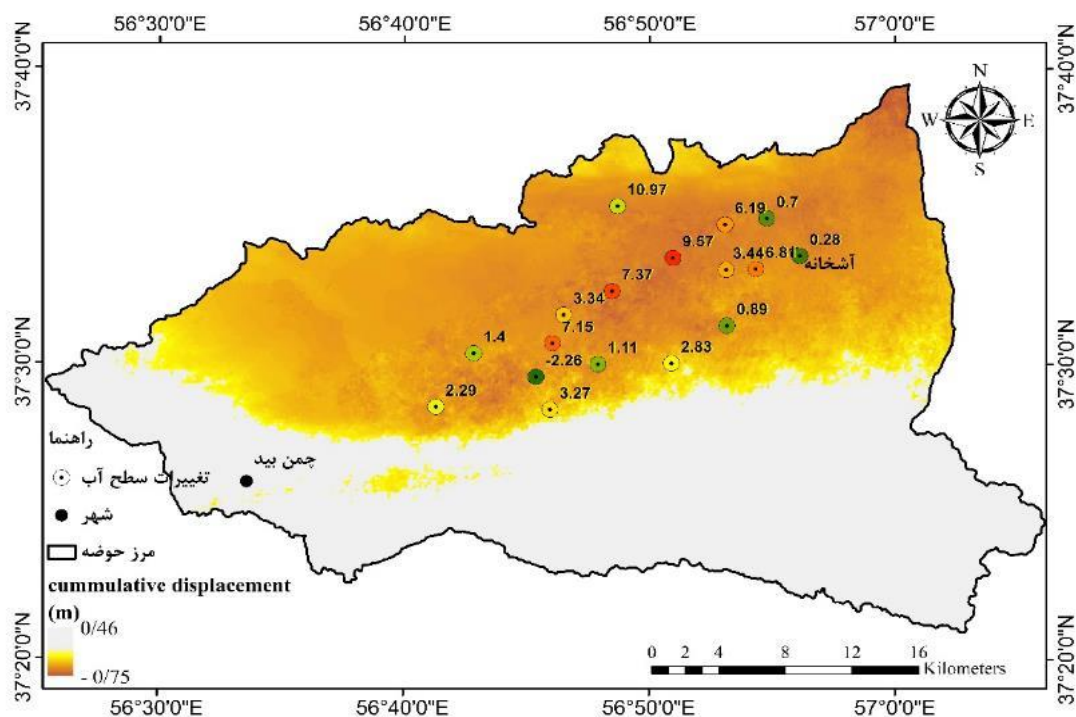
شکل ۴-۲۴. نقشه جهت حرکت آب‌های زیرزمینی

۴-۳-۴- ارتباط افت سطح آب زیرزمینی با فرونشست

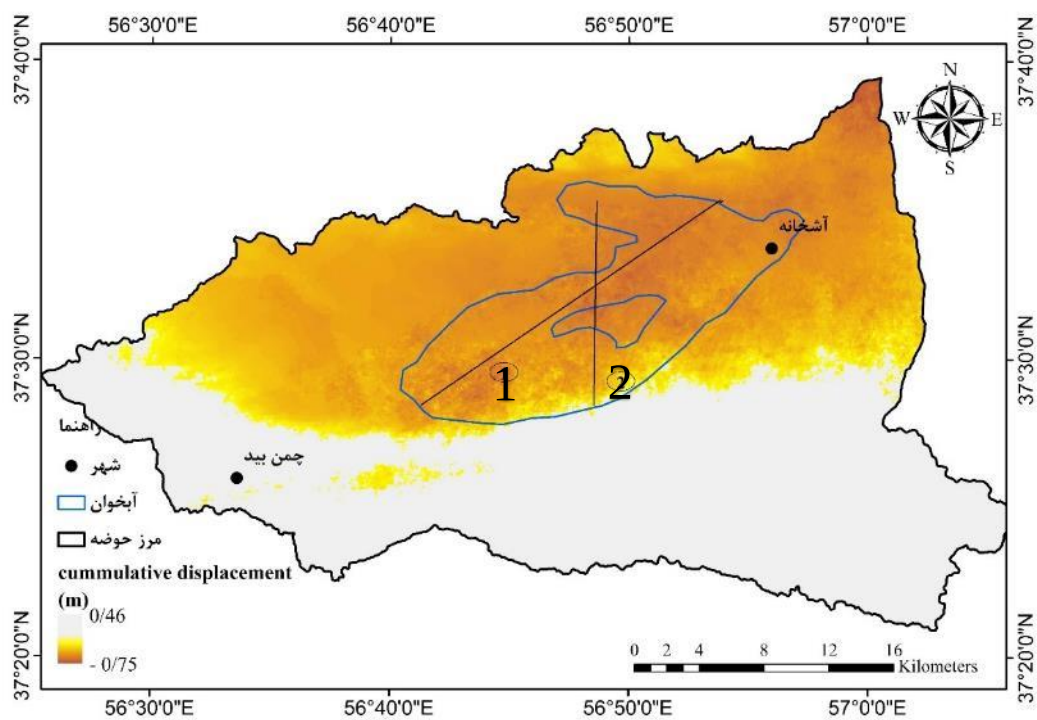
همان‌گونه که در شکل ۴-۲۵ مشاهده می‌شود، در تمام نقاطی که چاه‌های پیزومتری افت داشته‌اند، فرونشست نیز رخ داده است. همچنین در قسمت‌هایی که افت آب کم بوده شعاع فرونشست در نواحی اطراف چاه کمتر بوده و بالعکس، فرونشست در اطراف چاه‌های با افت بیشتر، با شعاع بیشتری گسترده شده است. فرونشست بخش‌های کم ارتفاع سملقان که در آن تمرکز زمین‌های کشاورزی زیاد بوده و برداشت آب در آن مناطق زیاد انجام می‌گردد را کاملاً تحت تأثیر قرار داده است.

به‌منظور درک بهتر ارتباط تغییرات سطح آب با فرونشست زمین دو مقطع در آبخوان سملقان ترسیم شد. موقعیت دو خط ترسیمی در شکل ۴-۲۶ (الف) نشان داده شده است. اولین خط به ترتیبی رسم شده که طول زیادی از آبخوان دشت سملقان را در بر گرفته و هم‌زمان از موقعیت تعداد بیشتری پیزومتر عبور کند، دومین خط نیز در راستای دیگری ترسیم شده و سعی شده در آن پیزومتر W4 که با بیشترین

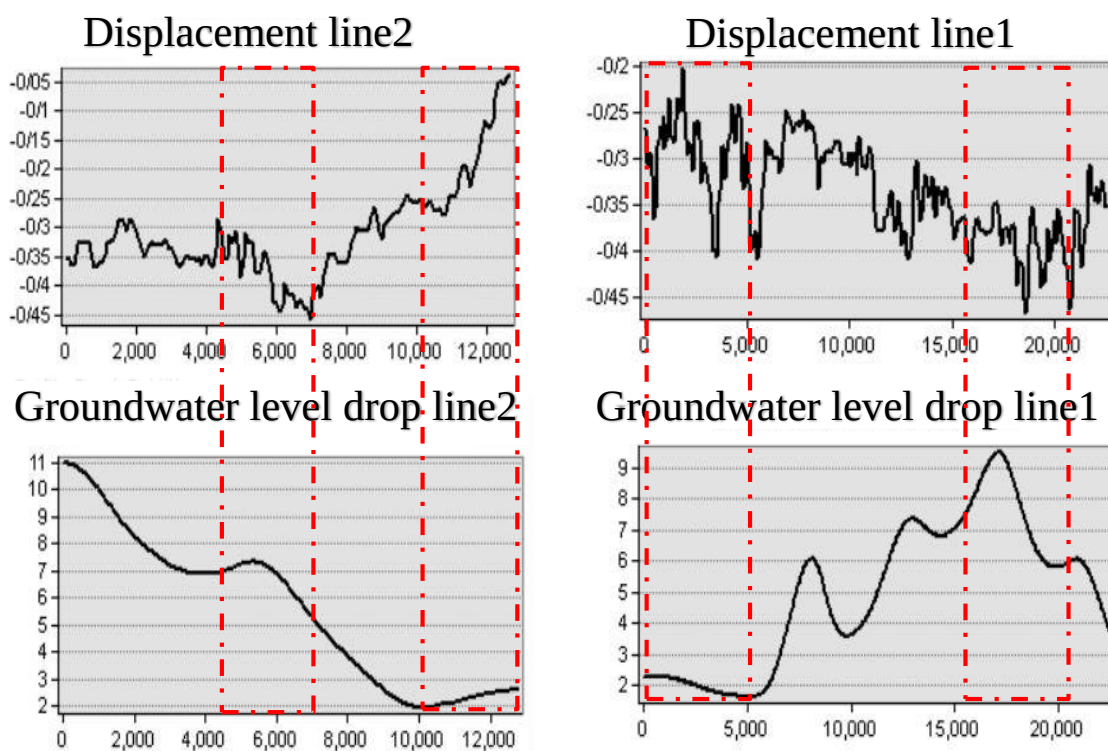
افت سطح آب در نظر گرفته شود. پس از آن گراف‌های تغییرات سطح زمین و افت سطح آب در شکل ۲۶-۴ (ب) ترسیم شد. به خوبی قابل مشاهده است که هرچه افت سطح آب بیشتر است فرونشست بیشتری در منطقه رخ می‌دهد. چند نمونه از نقاطی که ارتباط قوی‌تری بین افت سطح آب و فرونشست زمین در آن‌ها رؤیت شده در شکل توسط کادر قرمز رنگ مشخص شده‌اند. با افت کمتر سطح آب میزان فرونشست نیز کاهش یافته است. در بخش بعد در مورد فرونشست در موقعیت چاه‌های پیزومتری بحث خواهد شد که تغییرات فرونشست نسبت به زمان نیز در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲۵-۴. پراکندگی پیزومترهای موجود در دشت و افت سطح آب در آن‌ها و موقعیت این چاه‌ها نسبت به فرونشست رخ داده در منطقه



(الف)

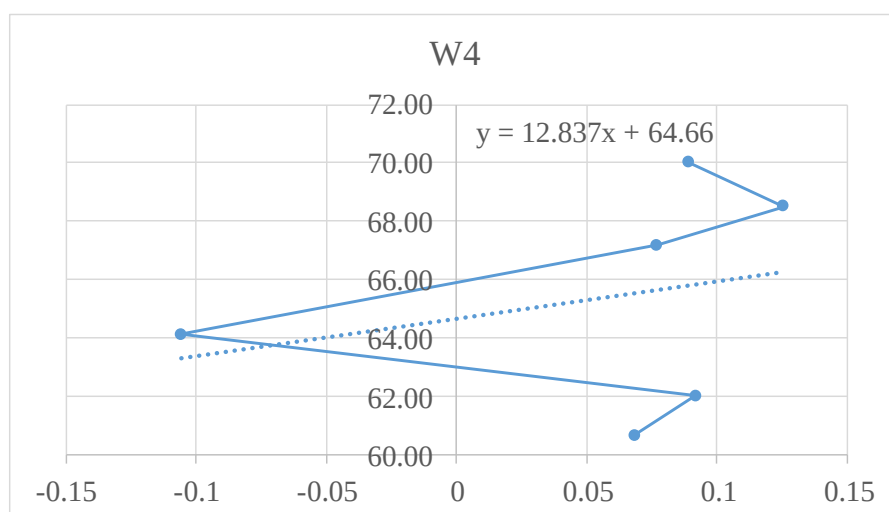


(ب)

شکل ۴-۲۶. برش منطقه و بررسی پلات‌های جابه‌جایی

۴-۴- بررسی رفتار متقابل آبخوان

یکی از راه‌های روش‌های بررسی ارتباط میان تغییرات سطح آب زیرزمینی و تغییرات سطح زمین آن است که این دو پارامتر بر روی نمودار برده شوند تا تغییرات سطح آن‌ها با یکدیگر مقایسه شود. پس از آنکه تغییرات سطح آب بر روی ستون y و تغییرات سطح زمین با استفاده از داده‌های تداخل سنجی بر روی محور x قرار گرفتند، بهترین خط از میان این داده‌ها برازش داده می‌شود و از معکوس شیب این خط، ضریب ذخیره سفره تخمین زده می‌شود. این ضریب ذخیره نمایانگر نفوذپذیرترین بخش آبخوان است. خط برازش داده‌شده می‌تواند به ازای افت مقدار مشخصی از سطح آب، مقدار تقریبی فرونشست را برآورد نماید [46].



شکل ۴-۲۷. نمودار تنش-کرنش مربوط به چاه W4

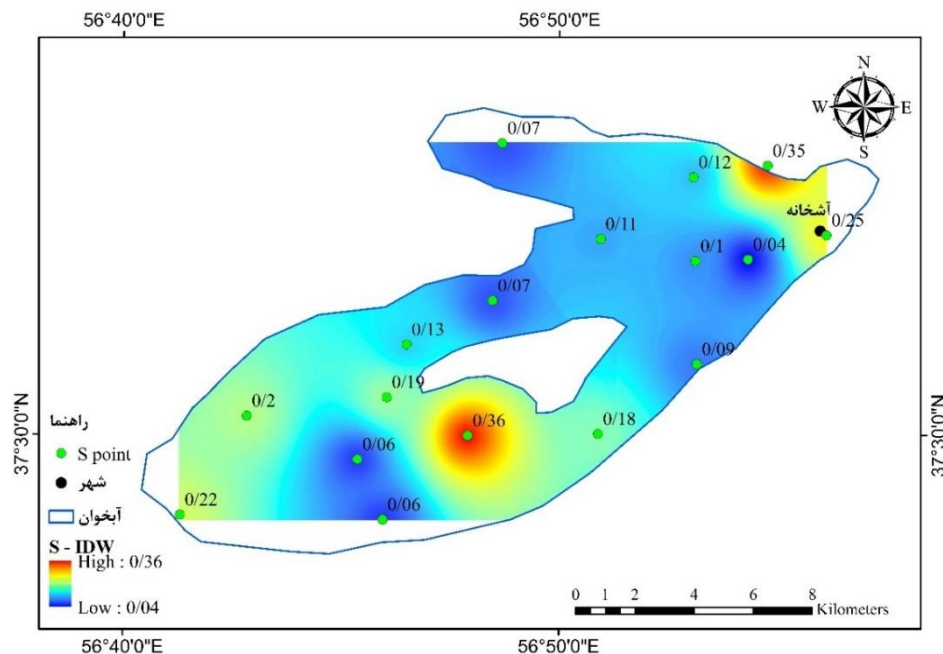
در شکل ۴-۲۷ محور افقی نشان‌دهنده مقدار کرنش به وقوع پیوسته در بازه ۲۰۲۰-۲۰۱۴ در موقعیت چاه مشاهداتی W4 و محور عمودی نماینده تنش اعمال‌شده متناظر با این نقطه است. بدین ترتیب که میزان فرونشست در هر سال با سطح آب در همان سال به صورت نقطه‌ای ترسیم‌شده و این نقاط به ترتیب سال به یکدیگر متصل شده‌اند. علت انتخاب چاه W4 آن است که بیشترین افت سطح آب در این چاه رخ داده است. نمودار سایر چاه‌ها در پیوست قرار داده شده. از معکوس شیب بهترین خط برازش داده‌شده برای داده‌های چاه W4، ضریب ذخیره در این نقطه برابر با ۰,۰۷ محاسبه شد. به همین ترتیب

برای تمام چاه‌ها این مقدار محاسبه و در نتایج در جدول ۴-۴ ثبت شد. کمترین مقدار ضریب ذخیره محاسبه‌شده، طبق جدول ۴-۴ برابر با ۰,۰۴ و بیشترین مقدار برابر با ۰,۳۶ است.

هرچه مقدار ضریب ذخیره محاسباتی بیشتر باشد، جابه‌جایی سطح زمین حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات سطح آب دارد. در نتیجه در چاه W6 با تغییرات ثابت سطح آب فرونشست بیشتری نسبت به سایر چاه‌های پیزومتری رخ می‌دهد. به بیان دیگر، ضریب ذخیره آبخوان نمایانگر میزان حجم آب آزادشده از آبخوان است هنگامی که سطح پیزومتری به اندازه یک متر کاهش پیدا کند، حال هرچه این ضریب بزرگ‌تر باشد حجم آب خارج‌شده بیشتر بوده و تنش میان دانه‌های خاک بیشتر شده در نتیجه فرونشست بیشتری رخ خواهد داد. با توجه به مقادیر S محاسبه‌شده، می‌توان به صورت تقریبی در صورت تغییرات سطح آب زیرزمینی، میزان جابه‌جایی را محاسبه نمود. به دلیل نقطه‌ای بودن این داده‌ها نمی‌توان برای نقطه دیگری از آبخوان از ضریب ذخیره به منظور بررسی تغییرات سطح زمین استفاده نمود، به همین دلیل با استفاده از GIS و درون‌یابی با روش IDW برای سایر نقاط آبخوان نقشه تغییرات ضریب ذخیره تقریبی آبخوان نسبت به مکان ترسیم شد که در شکل ۴-۲۸ قابل مشاهده است.

جدول ۴-۴. مقدار ضریب ذخیره برآورد شده در موقعیت هر چاه پیزومتری

well ID	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9
S value	0.35	0.09	0.07	0.07	0.2	0.36	0.13	0.11	0.06
well ID	W10	W11	W12	W13	W14	W15	W16	W17	
S value	0.25	0.06	0.19	0.12	0.22	0.1	0.04	0.18	

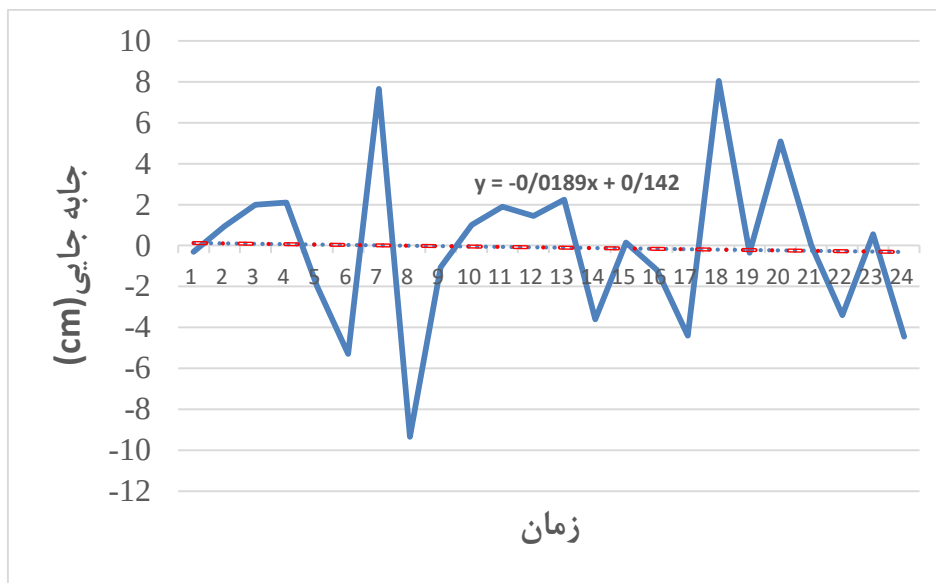


شکل ۴-۲۸. مقدار ضریب ذخیره درونیابی شده آبخوان، با استفاده از روش IDW

یکی دیگر از جنبه‌های رفتار آبخوان که در این مطالعه انجام گردید بدین صورت بود که به فاصله شعاعی ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۴۰۰۰ متر از چاه‌های مشاهداتی، تمامی نقشه‌های جابه‌جایی تولیدشده در جهت پایین گذر با استفاده از نرم‌افزار GIS برش داده شدند. میزان حداکثر و حداقل فرونشست برای داده‌های تولیدی برداشت‌شده و میانگین آن‌ها بر روی نمودار برده شد. مشاهده شد که در فاصله ۴۰۰۰ متری نتایج مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و اختلاف قابل توجهی با مقادیر استخراج‌شده در فاصله شعاعی ۱۰۰۰ متری ندارند. در فاصله شعاعی ۱۰۰۰ متری نیز تأثیر چاه‌های مجاور تا حدی رؤیت شد. به همین دلیل مقادیر استخراج‌شده از فاصله شعاعی ۴۰۰۰ متر از تحلیل‌ها خارج شد. پس از آن میانگین داده‌های برداشت‌شده برای هر سال در فاصله ۲۵۰ متری که نزدیک‌تر به هر چاه بود یک نمودار ترسیم شد (شکل ۴-۲۹).

با توجه به روند تغییرات سطح زمین در بازه مورد مطالعه، کل بازه به ۴ دوره تقسیم شد که شامل هردو رفتار بالاآمدگی و فرونشست زمین بودند. همچنین یک خط بر روی نمودار برازش داده شد که نماینده رفتار غیر الاستیک در منطقه می‌باشد. ترتیب قرارگیری داده‌ها در شکل ۴-۲۸ به صورت صعودی می‌باشد، به گونه‌ای که ۱ نماینده اولین تداخل نگار تولیدشده در سال ۲۰۱۴ و ۲۴ آخرین تداخل نگار

تولیدشده مربوط به سال ۲۰۲۰ است.



شکل ۴-۲۹. نمودار میانگین تغییرات سطح زمین در فاصله ۲۵۰ متری از چاه‌های مشاهداتی منطقه

رفتار قابل‌انتظار غیر الاستیک در منطقه باید مطابق خط برازش داده‌شده در شکل ۴-۲۹ باشد. با توجه به عدم پیروی سیستم آبخوان از این روند و یا در نزدیک‌ترین فاصله به آن، می‌توان گفت رفتار آبخوان سملقان الاستیک است. پس از انتخاب دوره‌های زمانی مورد مطالعه، نسبت مقدار بالآمدگی به فرونشست (SR) و نسبت بازه زمانی آن‌ها در هر دوره (TR) محاسبه شد (جدول ۴-۵).

جدول ۴-۵. میانگین تغییرات سطح زمین در ۴ بازه انتخابی مورد مطالعه در فواصل مختلف از چاه‌های مشاهداتی، نسبت میزان بالآمدگی به فرونشست و نسبت زمانی بالآمدگی به فرونشست

Cycle	Phase	250m from well field	500m from well field	1000m from well field
Cycle1	Recovery	1.19	0.93	1.34
Recovery: 2014.11.3-2015.8.6	Extraction	-3.65	-4.45	-3.95
Extraction: 2015.8.6-2016.2.14	SR	32.00%	20.00%	33.00%
	TR	1.43	1.43	1.43
Cycle2	Recovery	7.65	8.15	9.15
Recovery: 2016.2.14-2016.5.20	Extraction	-9.35	-9.55	-9.35
Extraction: 2016.5.20-2016.8.24	SR	81.00%	85.00%	97.00%
	TR	1.00	1.00	1.00

Cycle3	Recovery	0.83	0.88	1.23
Recovery: 2016.8.24-2017.11.11	Extraction	-2.26	-2.45	-2.99
Extraction: 2017.11.11-2018.11.6	SR	36.00%	35.90%	41.00%
	TR	1.23	1.23	1.23
Cycle4	Recovery	8.05	8.05	7.40
Recovery: 2018.11.6-2018.3.11	Extraction	-0.43	-0.82	-1.09
Extraction: 2015.8.6-2016.2.14	SR	1800.00%	980.00%	678.00%
	TR	0.26	0.26	0.26

رابطه میان طول دوره هر بازه فرونشست-بالآمدگی محاسبه شد. به این منظور نسبت بالآمدگی به فرونشست و نسبت زمانی آن‌ها بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده بیشترین مقدار میانگین فرونشست در دوره دوم و بیشترین مقدار بالآمدگی نیز در همان دوره است. بیشترین نسبت بالآمدگی به فرونشست در دوره چهارم است. به‌منظور دستیابی به مدیریت بهینه آبخوان، بهترین میزان نسبت زمانی بین ۲-۴ است. هرچه مقدار به‌دست‌آمده به این اعداد نزدیک‌تر باشد به بازه زمانی بهتری جهت مدیریت منطقه دستیابی خواهد شد. با این تفاسیر، طول دوره آماری انتخاب‌شده با توجه به روند رفتار زمین، اولین دوره بهترین فاصله زمانی را دارا است که در آن طول دوره بازیابی ۲۷۶ روز و طول دوره افت ۱۹۲ روز بوده است. سومین دوره فرونشست-بالآمدگی نیز مقدار TR مناسبی دارد که در آن طول دوره بازیابی ۴۴۴ روز و طول دوره افت ۳۶۰ روز بوده است.

با توجه به مقادیر SR، هرچه نسبت زمانی در هر دوره کوچک‌تر باشد، نسبت بالآمدگی پایش شده به فرونشست بیشتر می‌گردد. با توجه به بهینه‌ترین عدد ذکرشده، به‌منظور کاهش خسارات ناشی از فرونشست، می‌توان با تغییر قوانین و مدیریت مناسب منابع آبی، به ازای هرسال برداشت بی‌رویه از منابع دشت، دو سال دشت را وارد فاز بازیابی نمود.

۴-۵- ارتباط خاک با فرونشست

از مقایسه نتایج فرونشست تجمعی سالیانه با نقشه زمین‌شناسی، می‌توان سازند مناطقی که فرونشست بیشتری در آن‌ها رخ داده را مشخص نمود و با توجه به اطلاعات آن‌ها و بررسی لاگ چاه‌های منطقه بافت خاک آن منطقه را تشخیص داد. فرونشست در بخش‌های مختلفی از دشت سملقان رخ داده که در ادامه درباره آن‌ها بحث خواهد شد:

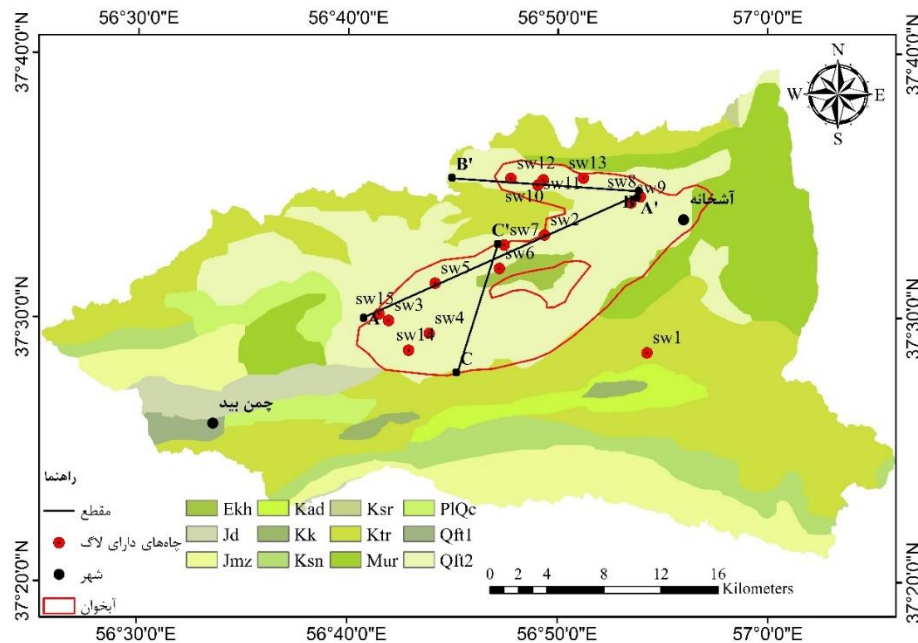
- ۱- شرق دشت سملقان، بر روی سازند مارن (Mur) شامل رسوبات ریز
 - ۲- شمال دشت سملقان، بر روی سازند تیرگان (Ktr) و تشکیل شده از آهک اوربیتولین دار
 - ۳- سازند سرچشمه (Ksr) در قسمت شرقی دشت سملقان حاوی مارن (که درصد بالایی از رس دارند)
 - ۴- مرکز دشت شامل تمام آبخوان سملقان و بخش میانی آن، روی نهشته‌های جدید (Qft2) تشکیل شده از رسوبات دانه‌درشت تا دانه‌ریز شامل رس، ماسه، سیلت و رس و سازند خانگیان (Ekh) تشکیل شده از ماسه‌سنگ
 - ۵- بخش‌هایی از شرق چمن بید در فاصله ۱۴ کیلومتری تا ۵ متری آن، همچنین جنوب چمن بید در فاصله ۲ کیلومتری شهر بر روی کنگلومرای پلیوسن (P1QC) که از ماسه‌سنگ و کنگلومرا تشکیل شده و بخشی از سازند کلات (Kk) شامل ماسه ریز و آهک‌های تخریبی
 - ۶- غرب دشت در فاصله ۴ کیلومتری شمال چمن بید بر روی بخش کوچکی از سازند (Jmz) که از آهک و دولومیت تشکیل شده است
 - ۷- فاصله ۵ کیلومتری از شمال شرق چمن بید و جنوب غربی آبخوان سملقان که بر روی بخشی از سازند چمن بید (Jd) واقع شده است
- بافت تشکیل‌دهنده سازندهای ذکر شده غالباً ریزدانه و از سنگ‌های انحلال‌پذیر است. غالب ذرات تشکیل‌دهنده این بخش‌ها- آهک، رس و رسوبات سیلتی- ریزدانه هستند که تأییدی بر این مسئله است

که فرونشست بیشتر در خاک‌های ریزدانه رخ می‌دهد. با توجه به رسی بودن بافت خاک در بیشتر این مناطق، نمی‌توان انتظار رفتار الاستیک زمین را داشت. به همین دلیل در این قسمت‌ها (سنگانه، مارن، نهشته‌های جدید) نمی‌توان ایده‌هایی جهت بازگشت سطح زمین ارائه داد. علاوه بر این جهت حرکت آب‌های زیرزمینی به سمت مرکز دشت می‌باشد و این مناطق خارج از آبخوان می‌باشد و این مناطق با سرعت بالایی تغذیه نمی‌شوند، به همین جهت در این مناطق باید استخراج آب‌های زیرزمینی با نظارت انجام گردد. بررسی لاگ چاه‌ها در آبخوان سملقان نشان‌دهنده آن است که در این آبخوان از شرق به غرب و از جنوب به شمال، از ریزدانه به درشت‌دانه تغییر می‌کند. به همین دلیل، اتخاذ تصمیم در این بخش‌ها باید متفاوت باشد، در بخش غربی و شمالی آبخوان می‌توان انتظار رفتاری الاستیک را داشت، در نتیجه می‌توان با تغذیه این بخش و یا هدایت آب‌ها از ارتفاعات به این قسمت‌ها فرونشست رخ داده را تا حد قابل قبولی بازیافت نمود. در مقابل در بخش شرقی و جنوبی آبخوان باید با کنترل برداشت از چاه‌ها و مدیریت بهره‌گیری از منابع آب، به‌طور مثال کاهش نیاز آبی کشاورزان از طریق اصلاح الگوی کشت، فرونشست را مدیریت نمود. به‌منظور کنترل فرونشست در آبخوان می‌توان به بررسی دقیق‌تر لایه‌های آبخوان با استفاده از لاگ چاه‌ها که اطلاعات آن در سایر مطالعات موجود بوده است پرداخت.

۴-۵-۱- بررسی تحت‌الارضی

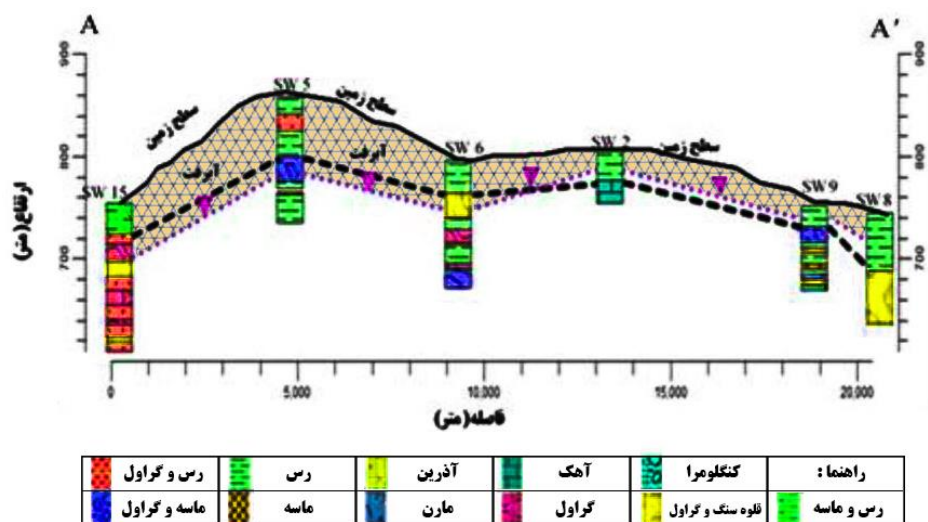
بررسی‌های زمین‌شناسی تحت‌الارضی دشت سملقان نشان‌دهنده ضخامت متغیر آبرفت این دشت است. در بخش شمالی این دشت، علاوه بر سطح، سازند تیرگان در عمق نیز مشاهده می‌شود. به سبب عمق کم سطح آب‌های زیرزمینی، بیشتر چاه‌های بهره‌برداری در این بخش قرار دارند. در بخش شرقی دشت، رسوبات نئوژن بر روی سازند تیرگان قرار دارند که عمده لیتولوژی این رسوبات کنگلومرا، مارن و سنگ‌های تبخیری می‌باشند. در بخش جنوبی دشت، به علت وجود سازند تیرگان کیفیت آب‌ها مطلوب است [98]. در این بخش با استفاده از اطلاعات لاگ چاه‌های موجود در منطقه در سه راستا لایه‌های

زمین‌شناسی تحت‌الارضی بررسی خواهد شد. موقعیت این چاه‌ها در شکل ۴-۳۰ و اطلاعات آن‌ها در جدول ۴-۶ قابل مشاهده است.



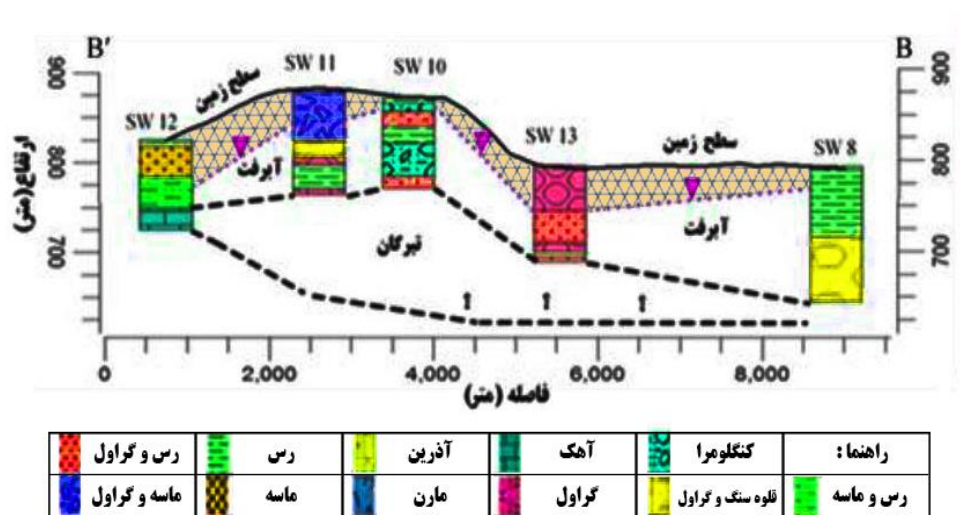
شکل ۴-۳۰. محل چاه‌های نمونه‌برداری کیفی و دارای لاگ حفاری

بررسی لاگ چاه‌ها در راستای AA' نشان داده رسوبات شمال شرق منطقه ریزدانه و به سمت جنوب غرب دشت رسوبات دانه‌درشت می‌شوند. در این راستا ضخامت آبرفت زیاد است به گونه‌ای که در چاه دهنه دلبر که عمق ۱۴۰ متری داشته به سنگ کف برخورد نکرده است. چاه عزیزآباد با توجه نزدیکی آن به سازند آهکی تیرگان، به سنگ آهک برخورد کرده است. این مسئله نشان‌دهنده آن است که در راستای AA' سنگ دارای عمق زیاد بوده و در بعضی نقاط سنگ کف آهک است (شکل ۴-۳۱).



شکل ۴-۳۱. لاگ حفاری چاه‌ها در راستای AA'

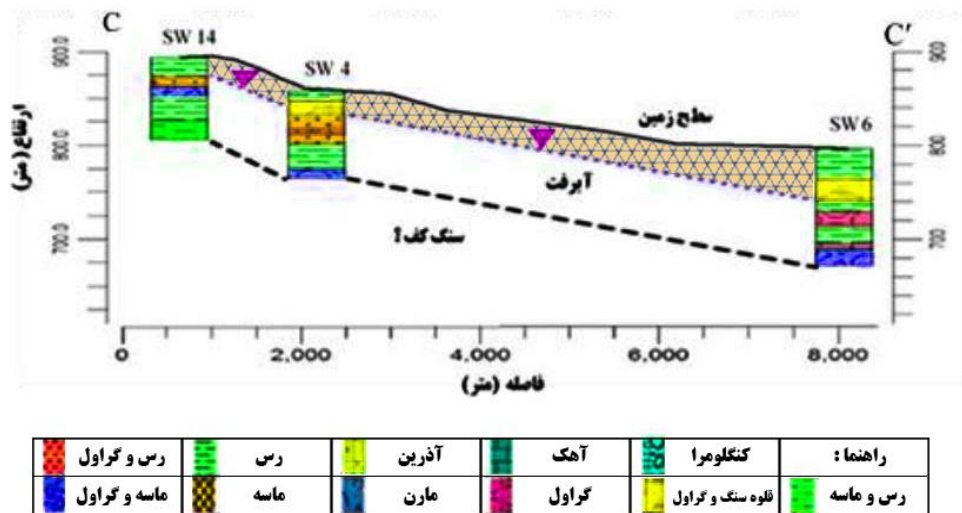
بررسی لاگ حفاری چاه‌ها در راستای BB' نشان‌دهنده آن است که از شرق به غرب رسوبات عمدتاً درشت بوده و با کاهش ضخامت رسوبات ریزدانه، ضخامت درشت‌دانه افزایش می‌یابد (شکل ۴-۳۲). آهک‌های تیرگان در عمق شمال غرب دشت قابل مشاهده است. در بخش غربی دشت آهک‌های تیرگان در سطح زمین قابل مشاهده است.



شکل ۴-۳۲. لاگ حفاری چاه‌ها در راستای BB'

با توجه به تغذیه آب دشت از سازند آهکی تیرگان در شرق و جنوب دشت و خروجی دشت از سازند نئوژن، تیپ آب از بی کربناته به کلروره تغییر یافته و کیفیت آن کاهش می‌یابد.

بررسی‌ها در راستای 'CC نشان‌دهنده آن است که تغییرات توپوگرافی از جنوب به شمال دشت کم می‌شود. بین دو چاه اختلاف ارتفاع ۹۴ متری وجود دارد، از جنوب به شمال دشت عمق آب افزایش می‌یابد (شکل ۴-۳۳). بررسی‌ها در این راستا نشان‌دهنده آن است که از جنوب به شمال دشت، ضخامت رسوبات درشت‌دانه افزایش یافته است [98].



شکل ۴-۳۳. لاگ حفاری در راستای 'CC

۴-۶- ارتباط تغییرات پوشش گیاهی با فرونشست

در مطالعات مرتبط با تغییرات سطح زمین می‌توان از دو جنبه پوشش گیاهی را بررسی نمود:

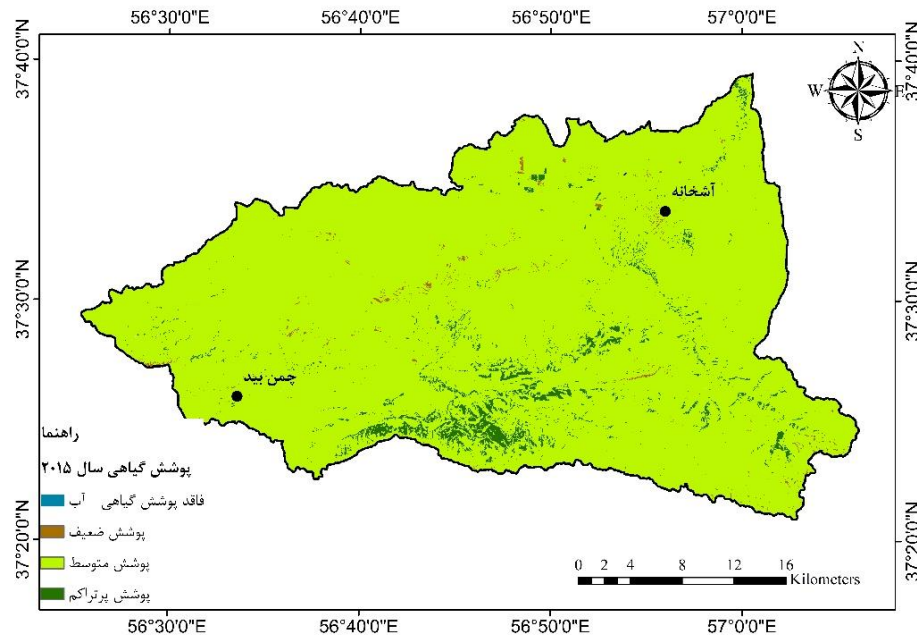
- ۱- با جابه‌جایی سطح زمین و فروریزش سطح آن (به‌طور مثال با وقوع پدیده فرونشست) امکان تخریب و یا تغییر پوشش گیاهی وجود دارد [108]
- ۲- با ایجاد ترک‌های زمین، الگوی خطی پوشش گیاهی در این شکاف‌ها مشاهده می‌گردد [63]

با وقوع پدیده فرونشست و تغییرات سطح زمین امکان تغییر تراکم و تغییرات تیپ گیاهی وجود دارد. به‌طور مثال با حرکت رواناب‌ها به سمت شکاف‌ها، الگوی خطی پوشش گیاهی در این مناطق مشاهده می‌گردد. بررسی پوشش گیاهی این منطقه جنبه دیگری نیز دارد و آن بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی است. افت شدید سطح آب می‌تواند منجر به کاهش گیاهان در برخی مراتع شود. پوشش

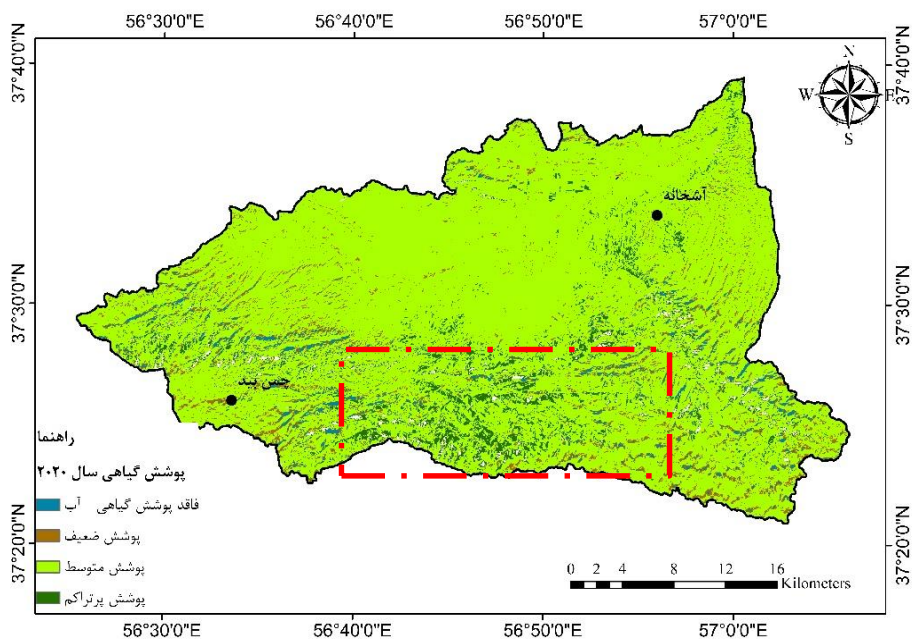
گیاهی عاملی مهم برای بررسی روند تغییرات سطح تراز آبخوان در نظر گرفته می‌شود. تغییرات تراز آب زیرزمینی می‌تواند موجب شود توالی اکولوژیکی گیاهان تغییر کند. گز، درختچه‌ها و سایر گیاهان خشک‌شده، از بین بروند و محل رویش درختچه‌ها به بوته‌زار تبدیل شوند. همچنین می‌تواند موجب تغییر گیاهان از لحاظ ارتفاع شود. تراکم پوشش گیاهی در بعضی مناطق تغییر کرده و مراتع غنی به فقیر تبدیل شوند. تیپ گیاهان آب‌دوست به گیاهان مقاوم در خشکی تغییر نماید. البته، تغییرات پوشش گیاهی می‌تواند با باران بهاره اتفاق بیفتد و یا با تغییرات بارش گیاهان یک‌ساله در منطقه رویش یابند و تغییری در نتایج مورد انتظار ایجاد کنند. از عوامل دیگری که باعث تغییر در نتایج مورد انتظار خواهد شد، دخالت‌های انسانی از جمله درختکاری و تغییر کاربری اراضی است. تغییرات مراتع ممکن است در بازه ۲ ساله رخ دهد و یا اثر تغییرات تراز آب تأخیر به وقوع بپیوندد. به همین جهت، تصویر تهیه‌شده پوشش گیاهی، دو سال بعد از آخرین داده‌های آماری آب‌های زیرزمینی تهیه شد. به‌منظور بررسی تغییرات پوشش گیاهی دشت سملقان از تصاویر Landsat 8 استفاده شد. پس از تهیه ۴ نقشه $NDVI^1$ شامل ۴ فصل مختلف سال و میانگین‌گیری آن‌ها برای هر سال، اقدام به تحلیل تغییرات پوشش گیاهی گردید. افزایش مقدار $NDVI$ به معنی افزایش فراوانی پوشش گیاهی و افزایش همگنی پوشش گیاهی است. کاهش $NDVI$ معرف آب، فضای باز، خاک لخت، ساخت‌وساز و از این قبیل فعالیت‌ها است [109]. در شکل ۴-۳۴ تصاویر میانگین پوشش گیاهی منطقه در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ نشان داده‌شده است. در مناطق پوشش گیاهی پرتراکم افزایش پوشش رؤیت شده است. مساحت این طبقه پوشش گیاهی از ۳۷۱ هکتار به ۶۲۳ هکتار افزایش یافته است. مناطق پرتراکم که در جنوب دشت سملقان وجود دارند، شامل جنگل‌های ارس منطقه و جنگل‌کاری‌های اداره منابع طبیعی خراسان شمالی هستند، این مناطق در شکل ۴-۳۴(ب) در کادر مشخص شده‌اند. همچنین در این مناطق که در نقشه‌های جابه‌جایی بالآمدگی سطح زمین رؤیت شده بود، می‌توان گفت بازتاب امواج ارسالی رادار از درختان بوده و رشد

¹ Nomaralized Difference Vegetation Index

گیاهان بر روی نقشه‌های فرونشست ثبت شده است. این پوشش گیاهی در نزدیک روستاهای اطراف آشخانه نیز در قطعات مستطیل شکل رؤیت شده که می‌توان گفت باغات منطقه هستند.



(الف)



(ب)

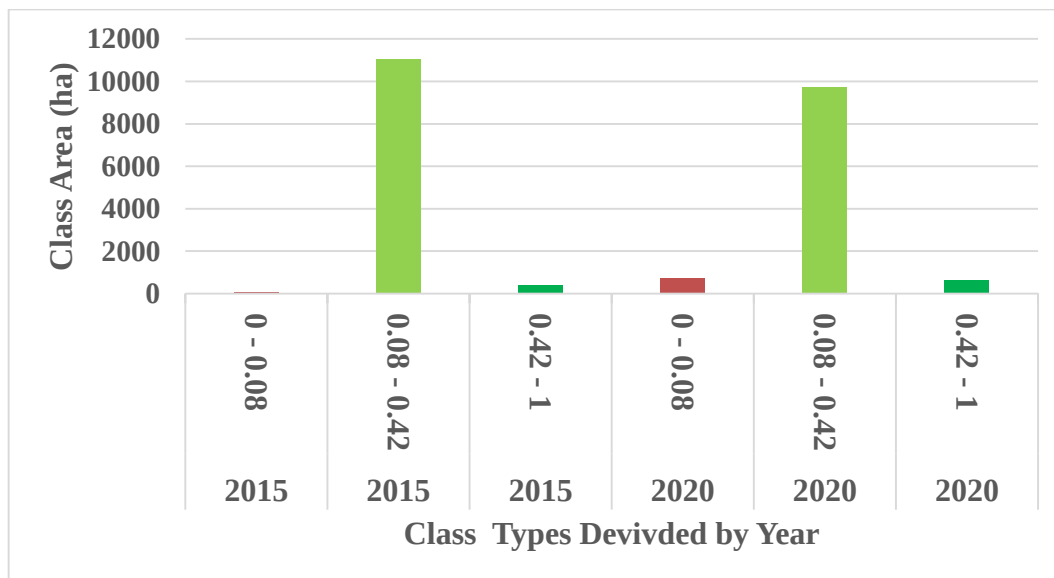
شکل ۴-۳. نقشه پوشش گیاهی دشت سملقان (الف) سال ۲۰۱۵ و (ب) سال ۲۰۲۰

طبقه پوشش گیاهی متوسط، ۱۳۱۶ هکتار کاهش یافته است که بخشی از آن به پوشش گیاهی پرتراکم و بخش زیادی از آن به پوشش فقیر تبدیل شده است. با توجه به نقشه‌های پوشش گیاهی، می‌توان مشاهده نمود در بیشتر این بخش‌ها تخریب پوشش گیاهی رخ داده و یا در این مکان‌ها آب تجمع یافته که می‌تواند در موقعیت شکاف‌های دشت رخ داده باشد. در برخی مناطق نیز افزایش پوشش گیاهی مشاهده می‌گردد که با توجه به الگوی برداشت شده از آن‌ها، به‌خصوص در اطراف شهر آشنانه، می‌توان گفت تغییرات کاربری اراضی به باغات به وقوع پیوسته است و احتمالاً مراتع تبدیل به این اراضی شده‌اند. طبقه پوشش گیاهی متوسط بیشترین مساحت دشت را در برمی‌گیرد. پوشش گیاهی فقیر که مقدار NDVI آن معادل بازه ۰ تا ۰,۰۸ است، در سال ۲۰۱۵ در منطقه بخش کمی را شامل می‌شده و بسیار پراکنده بوده است و همان‌طور که در جدول ۴-۶ مشاهده می‌شود مساحت این طبقه تا حد قابل توجهی افزایش یافته است که در آبخوان سملقان، اطراف آشنانه و چمن بید و بخش‌هایی از شمال منطقه قابل‌رؤیت هستند. با توجه به تغییرات این طبقه، ۵,۹٪ از مساحت دشت سملقان با تخریب پوشش گیاهی مواجه شده است. به‌طور عمومی سطح مناطقی که پوشش گیاهی فقیر داشتند از ۵,۰٪ به ۶,۴٪ افزایش یافته است. اطلاعات این مناطق در جدول ۴-۶ به‌طور مختصر ذکر شده و به‌صورت نمودار میله‌ای در شکل ۴-۳۵ ترسیم شده است.

با توجه به نقشه‌های آب زیرزمینی، در جنوب شرق، شمال و شمال غرب دشت سملقان بیشترین افت سطح آب برآورد شده که در این مناطق نیز تغییر پوشش گیاهی پرتراکم به متوسط و متوسط به ضعیف و یا فاقد پوشش گیاهی را شاهد می‌باشیم. همچنین در بخش جنوب و جنوب غرب دشت سملقان نیز تغییرات پوشش گیاهی زیادی رخ داده که در این مناطق افت سطح آب تا ۴ متر برآورد شده است.

جدول ۴-۶. وضعیت تغییرات پوشش گیاهی از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۲۰

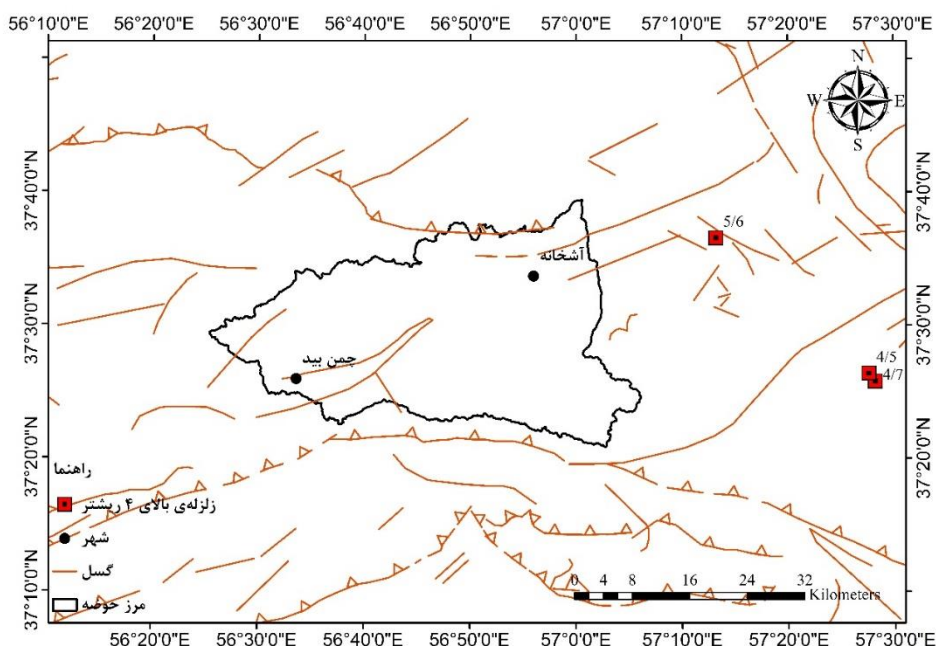
مقدار NDVI	سال ۲۰۱۵ (هکتار)	سال ۲۰۲۰ (هکتار)	تغییرات نسبت به مساحت کل (%)
پوشش ضعیف ($0.08 >$)	۶۰,۱۵	۷۴۵,۲۵	۵,۹٪
پوشش متوسط ($0.08 - 0.42$)	۱۱۰۴۱,۲۵	۹۷۲۴,۸۹	-۱۱,۴٪
پوشش پرتراکم ($0.42 - 1$)	۳۷۱,۳۰	۶۲۳,۰۲	۲,۱۲٪



شکل ۴-۳۵. نمودار میله‌ای مساحت طبقات پوشش گیاهی در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰

۴-۷- ارتباط زمین‌لرزه‌ها با فرونشست

به‌منظور بررسی میزان تأثیرگذاری شرایط تکتونیکی و زمین‌لرزه‌های به وقوع پیوسته بر فرونشست منطقه، زمین‌لرزه‌های بالای ۴ ریشتر از مرکز لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران تهیه شد. در بازه زمانی مورد مطالعه هیچ زلزله بالای ۴ ریشتری که مرکز آن در دشت سملقان باشد و یا فاصله کمی با منطقه داشته باشد وجود ندارد. این زلزله‌ها تأثیر زیادی (در حد سانتی‌متر) بر جابه‌جایی منطقه مورد مطالعه ندارند. کانون زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه در شکل ۴-۳۶ قابل مشاهده هستند.



شکل ۴-۳۶. مرکز نزدیک‌ترین زلزله‌های رخ داده از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ و موقعیت آن‌ها نسبت به دشت

۴-۸- شواهد فرونشست در منطقه

به‌منظور تعیین اعتبار یافته‌های تحقیق و همچنین جمع‌آوری شواهد میدانی از وقوع پدیده فرونشست در دشت سملقان، عملیات پیمایشی انجام گرفت. فرونشست آثار مختلفی بر مناطق دشت داشته است. در این بخش به بررسی‌های میدانی انجام‌شده در منطقه پرداخته‌شده است. آثار فرونشست به‌صورت شکاف زمین، ترک دیوار، لوله زایی چاه‌ها و ایجاد چاله در زمین قابل‌مشاهده است. نشست در برخی نقاط دشت همراه با شکاف سطحی و در برخی نقاط فاقد این شکاف‌ها است و به‌صورت نشست یکنواخت و متجانس مشاهده می‌گردد. نشست متجانس مناطق گسترده‌ای پوشش داده‌شده و غالباً به‌طور یکسان رخ می‌دهد قابل احساس نیست. نشست در مقیاس بالا به‌صورت لوله زایی در چاه‌های آب و تغییر شیب زمین قابل‌مشاهده می‌باشد (شکل ۴-۳۷). این نکته نیز قابل‌ذکر است که نشست‌هایی وجود دارد که انسان در ایجاد آن‌ها دخالتی نداشته و به‌طور طبیعی اتفاق می‌افتد.



شکل ۴-۳۷. برخی شواهد فرونشست در دشت سملقان (۱۳۹۹، ۱۱، ۰۶ - توسط نگارنده)

۴-۸-۱- ایجاد شق یا شکاف در زمین

شق‌های ایجادشده در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت سملقان، با توجه به نوع آن به‌صورت شکاف‌های خطی کششی به طول چند صد متر در مناطق مختلف دشت قابل‌مشاهده است. بسیاری از این شق‌ها در داخل زمین‌های کشاورزی تشکیل‌شده‌اند. این شکاف‌ها به علت فرار و نشت آب به داخل آن‌ها و همچنین به دلیل تغییر شیب زمین مشکلات زیادی برای کشاورزان ایجاد نموده‌اند. لذا کشاورزان دائماً نسبت به مسطح کردن زمین و محو آثار شکاف‌ها در زمین‌های زراعی خود اقدام می‌نمایند. در صورت ادامه نشست زمین و گسترش این شکاف‌ها مشکلات فراوانی در منطقه ایجاد خواهد شد. افت کیفیت آب‌های زیرزمینی از دیگر آثار مخرب این شکاف‌ها است. تشکیل شکاف‌ها

می‌تواند به صورت کانالی برای عبور و انتقال آلودگی‌های سطحی از جمله پساب و زهکشی ناشی از بخش کشاورزی به دنبال استفاده از کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات به آبخوان باشد [26]. نمونه‌ای از فرونشست ایجاد شده در دشت در شکل ۴-۳۸ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۳۸. نمایی از توسعه شکاف‌های دشت (۱۳۹۹، ۱۱، ۰۶ - توسط نگارنده)

۴-۸-۲- ایجاد درز و ترک‌های دیوار

نشست پی معمولاً منجر به نشست دیوار و ایجاد ترک در زیر سقف و پل می‌گردد. در دیوارهای آجری و دیوارهایی که با بلوک ساخته می‌شوند، این ترک‌ها معمولاً به صورت مورب از گوشه شروع شده و تا نزدیک قاب پنجره ادامه می‌یابند. ترک دیوار در بعضی مناطق موجب خسارت شده و حتی بعضی ساختمان‌ها را بلااستفاده نموده است. شکل ۴-۳۹ نشان‌دهنده ترک ساختمان هنرستان کشاورزی منطقه است که به علت نشست‌های زیاد رخ داده در محوطه آن بلااستفاده شده است.



شکل ۴-۳۹. ترک دیوار در هنرستان کشاورزی (۱۳۹۹، ۱۱، ۰۶ - توسط نگارنده)

۴-۸-۳- ایجاد چاله

فرونشست می‌تواند در اثر انحلال سنگ‌های تبخیری، آهکی و دولومیتی ایجاد شود. بدین گونه که در اثر انحلال این سنگ‌ها فضای خالی در زیرزمین تشکیل می‌شود که ممکن است در اثر ریزش سقف آن‌ها چاله‌های انحلالی ایجاد شوند. در منطقه مورد مطالعه که سنگ‌های تبخیری و آهکی در آن وجود دارند، احتمالاً پس از انحلال سنگ‌ها افت سطح آب رخ داده و با کاهش تنش مؤثر، در مناطق مختلفی چاله‌هایی در زمین ایجاد شده‌اند (۴-۴۰).





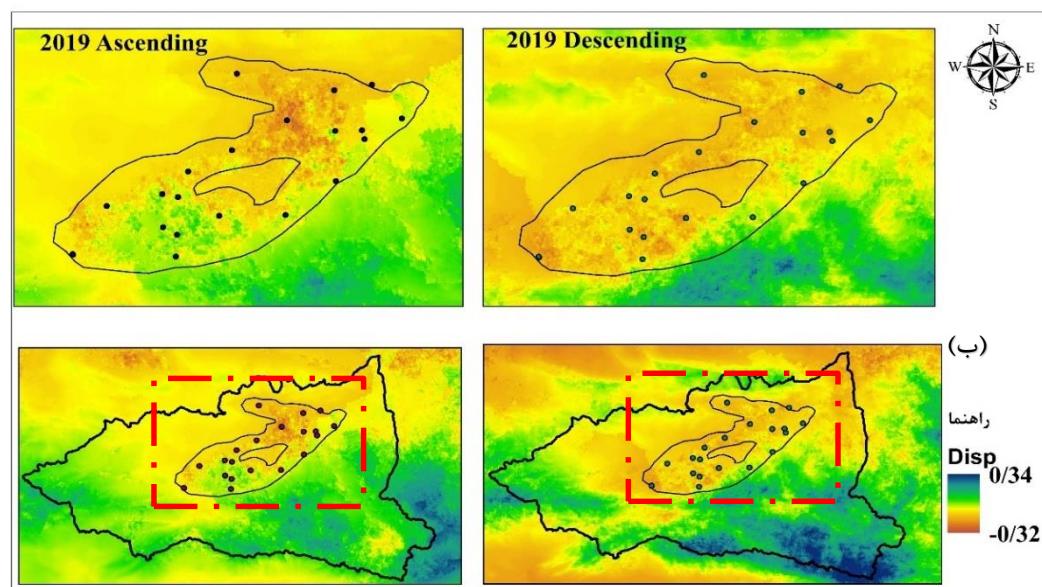
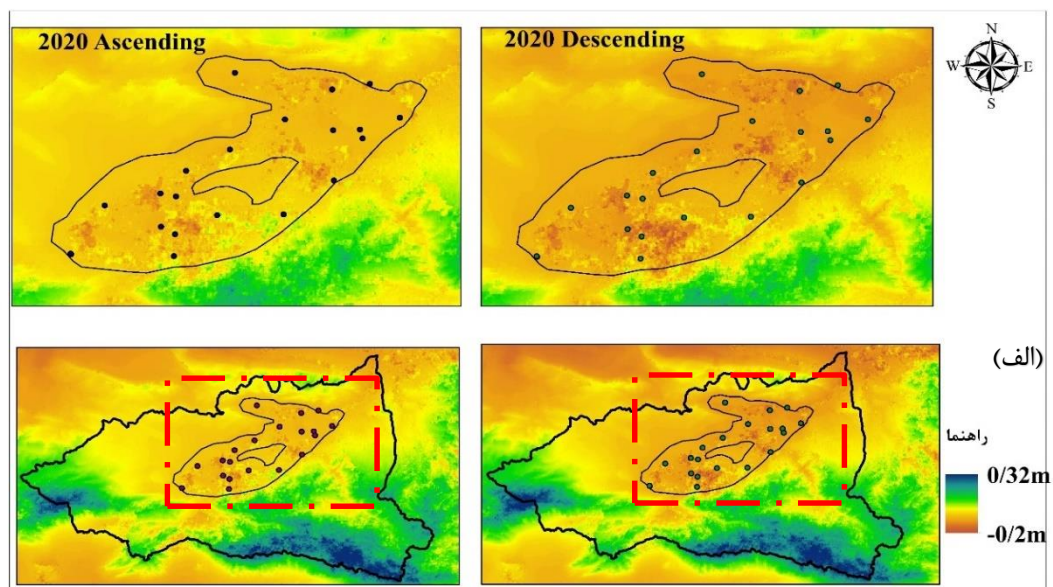
شکل ۴-۴۰. ایجاد چاله در مکان‌های مختلف دشت سملقان (۱۳۹۹، ۱۱، ۰۶ - توسط نگارنده)

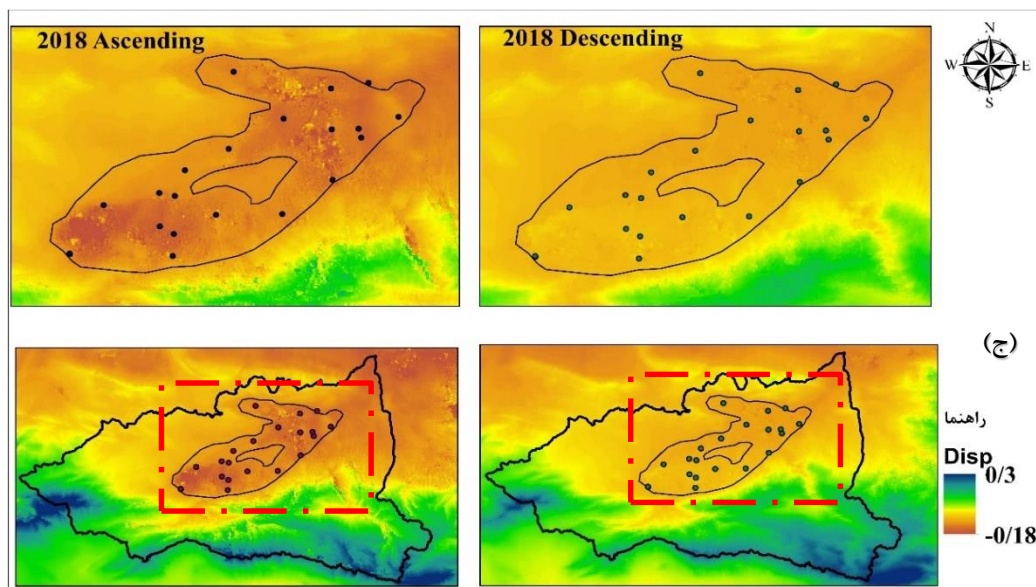
۴-۹- صحت سنجی

با توجه به این‌که در بازه زمانی مورد مطالعه و در منطقه مورد مطالعه داده‌های ایستگاه ثابت GPS و ترازیبی دقیق در دسترس وجود ندارد، لذا امکان ارزیابی مطلق نتایج حاصل از پردازش‌های تداخل سنجی راداری با استفاده از داده‌های زمینی وجود ندارد؛ به جهت ارزیابی نتایج پردازش در این منطقه از روش اعتبارسنجی نسبی استفاده شده است. بدین منظور پردازش تداخل سنجی راداری با استفاده از داده‌های مسیری متفاوت انجام خواهد گرفت و در صورتی‌که نتایج پردازش تداخل نگاری تصاویر بالا گذر و پایین گذر داده‌های ماهواره‌ای یک سنجنده تأییدکننده یکدیگر باشند، به صورت نسبی معتبر خواهند بود. در شکل‌های ۴-۴۱ (الف-ج) نتایج حاصل از تصاویر بالا گذر برای سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۸ آورده شده است. نتایج نشان‌دهنده الگوی تقریباً مشابه در دو سری داده‌ها هستند. مقادیر برداشت‌شده کمی متفاوت هستند که با توجه به تاریخ متفاوت تصویربرداری تا حدی قابل توجیه است. تصاویر پایین گذر سال‌های متناظر با تصاویر بالا گذر جهت بررسی الگوی فرونشست کنار یکدیگر قابل مشاهده هستند. مقادیر فرونشست در موقعیت نقاط چاه‌های پیژومتری، در هر دو سری داده استخراج و همبستگی آن‌ها در اکسل با استفاده از تابع Correl محاسبه و نتایج در جدول ۴-۸ نشان داده شد. میزان همبستگی نقاط انتخابی، همبستگی خوب داده‌های بالاگیر و پایین گذر را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۸. همبستگی میزان فرونشست پایش شده برای داده‌های بالاگیر و پایین گذر در موقعیت چاه‌های پیژومتری دشت سملقان

Year	Correl-Value
2018	0.72
2019	0.69
2020	0.89





شکل ۴-۴۱. نقشه‌های جابه‌جایی تجمعی سالانه برای داده‌های بالا گذر، (الف) سال ۲۰۲۰، (ب) سال ۲۰۱۹ و (ج) سال ۲۰۱۸

۱۰-۴- کنترل فرونشست

با توجه به نتایج حاصل از فرونشست و بررسی رفتار زمین، رفتار آبخوان الاستیک تشخیص داده شد اما با توجه به جهت حرکت آب‌های زیرزمینی و همچنین علم بر عدم تغذیه سایر مناطق دشت، نمی‌توان انتظار رفتار قابل بازگشت را در تمام دشت سملقان داشت. با توجه به شکل ۴-۱۴، در نقاط (A)، (B) و (C) می‌توان با تغذیه مقداری از نشست رخ داده را جبران نمود. در سایر نقاط دشت با کنترل برداشت از چاه‌ها، ساخت‌وساز در مناطق با خطر نشست بالا، تغییر الگوی کشت و راهکارهای دیگر سرعت وقوع این پدیده را به‌منظور کاهش خسارات تا حدی کاهش داد.

با توجه به دانه‌بندی خاک در منطقه مورد مطالعه، در ادامه پیشنهادهایی برای کنترل، کاهش سرعت روند و بازیابی فرونشست داده خواهد شد. پیشنهادها در دو بخش مدیریت منابع آب و بهسازی خاک ارائه شده است.

۴-۱۰-۱- مدیریت منابع آب

یکی از موضوعات پیچیده‌ای که با رشد جمعیت و افزایش تقاضا در آینده به وجود خواهد آمد مدیریت منابع آبی به‌منظور تأمین نیازها و کاهش خسارات ناشی از استحصال بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است. عوامل گوناگونی درافت سطح آب زیرزمینی نقش دارند که با مدیریت صحیح و ارائه راهکارهای مناسب این مسئله را کنترل نمود. اولین و مهم‌ترین گام آن است که با افزایش سطح آگاهی عمومی و جلب مشارکت مردم و انجام راهکارهای عملیاتی می‌توان از منابع آبی استفاده بهینه نمود و از این منابع ارزشمند محافظت به عمل آورد. می‌توان با اصلاح الگوی مصرف، فراهم نمودن امکانات آموزشی، بهداشتی و رفاهی در روستاها به‌منظور کاهش مهاجرت از روستا به شهر، استفاده از سیاست‌های تشویقی برای کشاورزان، کنترل میزان برداشت و ... روند انجام پروژه‌های بهینه‌سازی مصرف آب را تسریع و بهبود بخشید [14]. به‌منظور مدیریت افت آب زیرزمینی به چند طریق می‌توان اقداماتی انجام داد که در این بخش به آن‌ها خواهد شد.

الف: حفاظت از سفره

اولین مورد حفاظت از سفره‌های آب زیرزمینی است. این گام، گامی مهم در راستای کاهش سرعت افت آب‌های زیرزمینی است. بدین منظور چند اقدام قابل انجام است:

- تمرکززدایی از چاه‌های بهره‌برداری
- ادامه دادن وضعیت ممنوع دشت و عدم اعطای مجوز حفر چاه جدید در منطقه و همچنین اعمال قوانین سخت‌گیرانه پس از رفع ممنوعیت دشت و فروش مجوز
- انتقال آب از حوضه‌های مجاور به‌منظور تأمین کسری آب
- احیا نمودن قنات‌ها
- افزایش میزان نفوذ با احیا پوشش گیاهی در مراتع و آبخیزداری
- کنترل ساخت‌وساز در مناطق تغذیه سفره‌ها و جلوگیری از کاهش سطح آبیاری

- افزایش تغذیه سفره از طریق استفاده از چاه‌های تزریقی، افزایش نفوذ از رودخانه‌ها و مسیل‌ها، نفوذ سیلاب در قنات‌های خشک‌شده، تغذیه از طریق نفوذ آب‌های سطحی از گودال‌های طبیعی

ب: صرفه‌جویی در مصرف آب

صرفه‌جویی در مصرف آب از چند طریق به کاهش افت آب منطقه کمک می‌نماید: اول از طریق کاهش استخراج آب‌های زمینی، دوم از طریق کاهش مصرف آب‌های سطحی و افزایش تغذیه سفره. به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب چندین راه وجود دارد:

- تبیین مشکلات پیش‌رو و افزایش سطح آگاهی بهره‌برداران
- تصفیه فاضلاب و پساب‌ها و استفاده مجدد آن‌ها
- بهبود شرایط خاک از طریق استفاده از روش‌های آبیاری نوین و کاهش تبخیر
- تهیه الگوی کشت بهینه تولید نژادهای پر محصول و سازگار با منطقه و تشویق کشاورزان
- حذف کشت محصولات با نیاز آبی بالا
- ترویج کشت گلخانه‌ای در مناطق پرمصرف
- ترویج و توسعه آب‌کشت‌ها^۱ و اعطای تسهیلات
- بهره‌برداری چندجانبه از منابع آبی
- کاهش تلفات انتقال آب

۴-۱۰-۲- بهسازی خاک

با عملیات اصلاح خاک‌های رمل‌بند می‌توان روند توسعه شکاف‌های دشت سملقان را کاهش بخشید. با توجه به این‌که ترک‌ها در دشت سملقان به بعضی جاده‌ها رسیده و خساراتی به آن‌ها وارد کرده است

^۱ Hydroponic

می‌توان در هنگام راه‌سازی و یا ترمیم جاده‌ها با استفاده از بعضی فنون خسارات بعدی را کاهش داد. جمع‌آوری، تعویض و تراکم خاک، جمع‌آوری خاک‌های حساس به رطوبت، پایدارسازی شیمیایی با تزریق و استفاده از شمع یا پی از جمله کارهایی است که می‌توان در این راستا انجام داد. همچنین با تثبیت خاک می‌توان چسبندگی ذرات را افزایش داده و موجب افزایش دوام و مقاومت خاک در برابر فروریزش شد. تثبیت خاک به طرق مختلفی انجام می‌گیرد، یکی از متداول‌ترین روش‌های تثبیت خاک، کشت گیاه می‌باشد. این عملیات بیشتر در خاک‌های رسی انجام می‌پذیرد. تثبیت خاک همچنین طریق روش‌های شیمیایی و فیزیکی انجام می‌گیرد.

فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به خلاصه‌ای از نتایج حاصل پرداخته خواهد شد، سپس درباره فرضیات مطرح شده در فصل ۱ بحث شده و از محدودیت‌های موجود در انجام مطالعه گفته خواهد شد. در پایان پیشنهادهایی در راستای بهبود نتایج مطالعه ارائه گردیده است.

۵-۲- جمع‌بندی

این پژوهش باهدف اندازه‌گیری میزان فرونشست در دشت سملقان با استفاده از داده‌های راداری Sentinel-1 و ارتباط آن با افت سطح آب‌های زیرزمینی انجام پذیرفته است. در سال‌های اخیر سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه به علت برداشت بیش از حد افت زیادی داشته است. همچنین فرونشست مناطق زیادی را در این دشت تحت تأثیر قرار داده است. در میان عوامل مؤثر بر وقوع پدیده فرونشست، در دشت سملقان تأثیر افت آب‌های زیرزمینی و نوع خاک بر وقوع فرونشست بیشتر از سایر عوامل بوده است. نتایج حاصل بیانگر حداکثر فرونشست ۳۲ سانتی‌متر در راستای عمودی در سال ۲۰۱۹ و فرونشست تجمعی ۷۵ سانتی‌متری در بازه زمانی مورد مطالعه است. مقایسه دو سری داده بالا گذر و پایین گذر در این پژوهش، دقت نسبی آن‌ها را نسبت به هم نشان داده و موجب اطمینان بیشتر نسبت به نتایج گردیده است.

۵-۳- آزمون فرضیات

این پژوهش در راستای پاسخ به سه سؤال که در بخش ۱-۵ مطرح گردید انجام شده است. در ابتدای تحقیق به این سؤالات به صورت فرضی پاسخ داده شد و پس از انجام پژوهش و نتیجه‌گیری به انجام آزمون فرضیات جهت بررسی صحت این فرضیات پرداخته شد.

فرض ۱: داده‌های ماهواره راداری Sentinel-1 قادر است با دقت مناسبی فرونشست دشت را اندازه‌گیری نماید.

یکی از مزایای استفاده از داده‌های راداری، دقت زیاد در کنار هزینه اندک و سرعت بالای آن است. در این پژوهش از داده‌های Sentinel-1 پایین گذر استفاده شده است. در انجام این پژوهش سعی شده است داده‌های انتخابی با خط مبنای زمانی و مکانی مناسب انتخاب گردند تا خطای پردازش تا حد امکان کاهش یابد. به‌منظور انجام صحت سنجی از پیمایش میدانی و اعتبارسنجی نسبی با استفاده از داده‌های بالا گذر همین ماهواره استفاده شده است که نتایج همخوانی خوبی با یکدیگر داشتند. مقصودی و همکاران، ۱۳۹۸؛ نیز با استفاده از اعتبارسنجی نسبی، دقت نتایج مطالعه خود را بررسی نموده و الگوی نشست مشابهی را برای غرب تهران مشاهده نمودند [110].

فرض ۲: فرونشست در منطقه موردنظر نرخ افزایشی داشته است و با افت آب‌های زیرزمینی ارتباط مستقیم دارد و همچنین هرچه بافت خاک ریزدانه‌تر باشد فرونشست بیشتری اتفاق می‌افتد.

با توجه به بررسی بافت مناطقی که در آن‌ها فرونشست زیادی رخ داده است، فرونشست غالباً در مناطقی رخ داده است که خاک‌های رسی و آهکی در آن‌ها وجود دارد که مؤید این بخش از فرض دوم می‌باشد. مرادی و همکاران، ۱۳۹۸؛ بیان نمودند که فرونشست زمین با دانه‌بندی خاک رابطه مستقیم داشته و با افت سطح آب زیرزمینی عمل متراکم شدن در خاک ریزدانه به‌طور برجسته‌تری انجام می‌پذیرد [111]. همچنین با بررسی فرونشست در آبخوان سملقان، فرونشست در مناطقی که افت سطح آب زیرزمینی رخ داده است به میزان بیشتری و با شعاع بیشتری به وقوع پیوسته است. نرخ فرونشست با توجه به نتایج به‌صورت خطی افزایشی نبوده و رفتاری سینوسی دارد، اما به‌صورت عمومی فرونشست در بخش‌های ثابتی دیده می‌شود. دهقانی، ۱۳۹۴؛ نیز رفتاری سینوسی و تحت تأثیر افت سطح آب زیرزمینی برای دشت مشهد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری استخراج نمود [86]. مقدار فرونشست در طول

سال‌های مختلف، بسته به شرایط محیطی از جمله بارش، سطح آب میزان تخلیه و سایر شرایط متفاوت بوده اما وقوع آن در طول زمان متوقف نشده است که نشان‌دهنده اهمیت مدیریت منابع آب در این منطقه است.

فرض ۳: وضعیت زمین‌شناسی دشت به دلیل وجود لایه‌های متراکم رسی اجازه برگشت‌پذیری را نمی‌دهد و فقط می‌توان از طریق مدیریت کنترل نمود.

پس از بررسی رفتار سیستم آبخوان و نقشه‌های فرونشست، می‌توان عنوان نمود فرونشست در آبخوان سملقان قابل بازیابی تا نیمه قابل بازیابی است اما در سایر نواحی دشت نمی‌توان انتظار رفتار الاستیک را داشت.

۵-۴- محدودیت‌ها و پیشنهادها

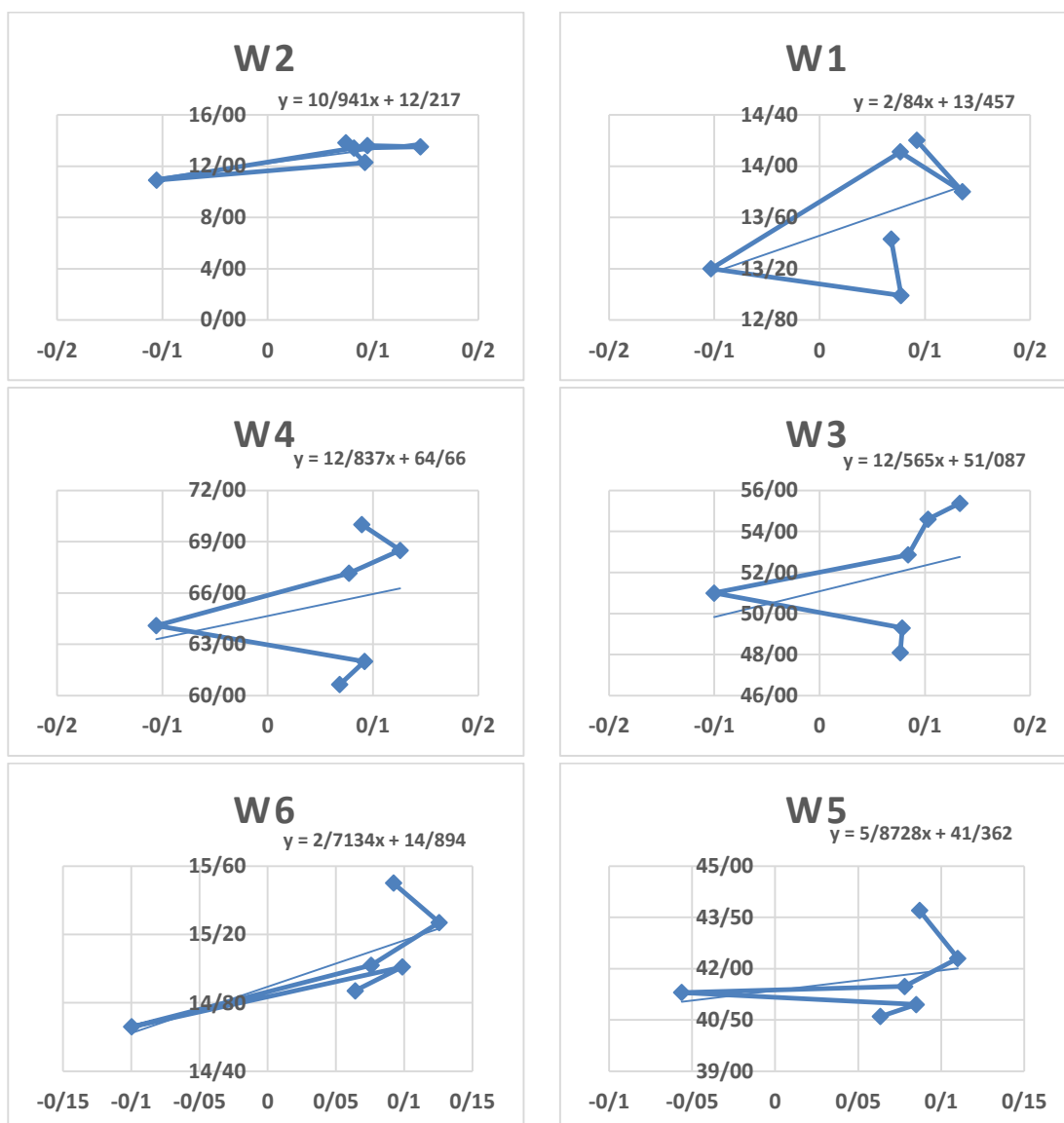
در این پژوهش موانعی موجب طولانی شدن روند کار و عدم دسترسی به نتایج دقیق‌تر گردید که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره خواهد شد:

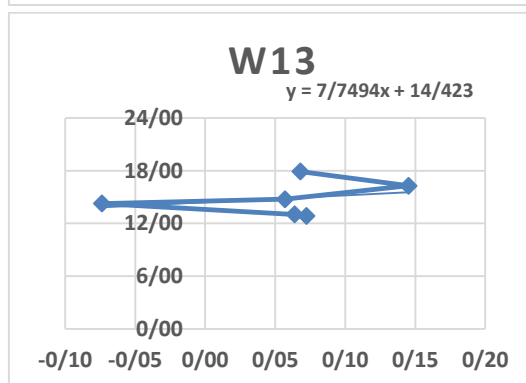
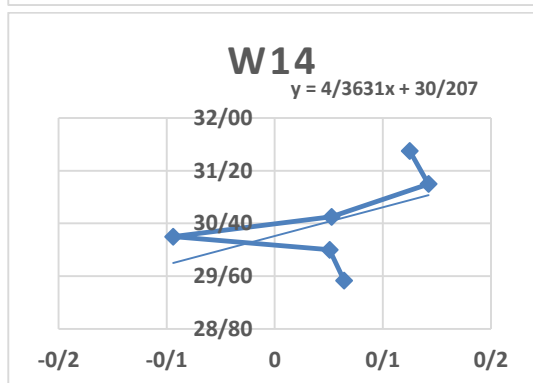
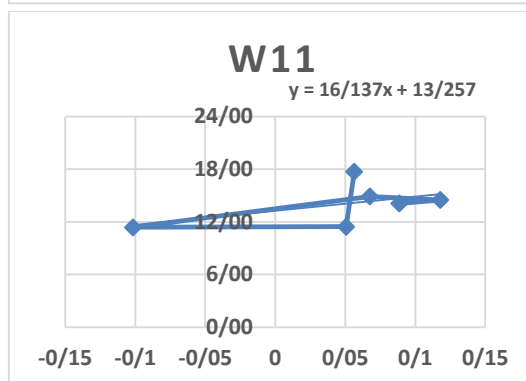
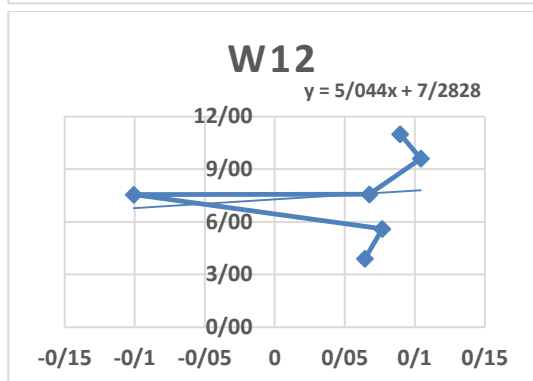
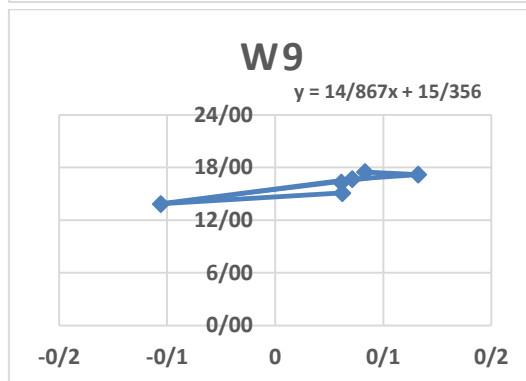
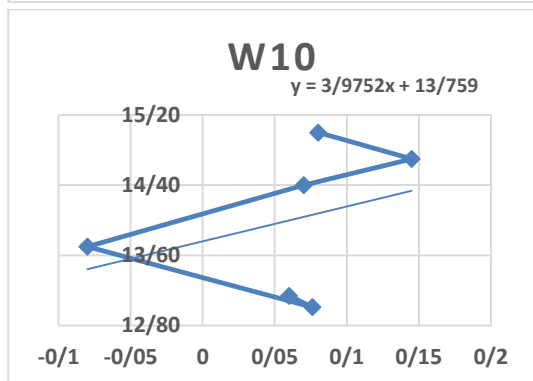
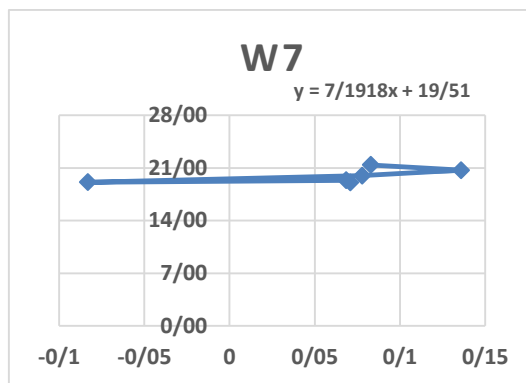
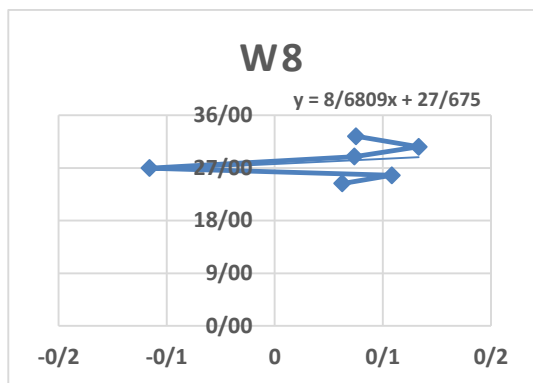
- عدم امکان تهیه تصاویر از سرور ایران
- عدم وجود داده‌های سایر ماهواره‌های راداری در منطقه مانند ماهواره‌های ALOS PALSAR, RADARSAT-1 که موجب کوچک‌تر شدن بازه زمانی گردید
- نیاز به پردازنده قوی در سیستم‌های کامپیوتری برای پردازش تصاویر راداری
- عدم همکاری مناسب سازمان‌های مربوطه جهت ارائه داده‌های زمینی به‌روز
- امکان خطا در پردازش
- به‌منظور افزایش دقت و کیفیت مطالعه حاضر، پیشنهادهایی ارائه خواهد شد:
- استفاده از روش‌های دیگر تداخل‌سنجی و مقایسه آن‌ها با روش مورد استفاده در پژوهش به‌منظور افزایش دقت مطالعه

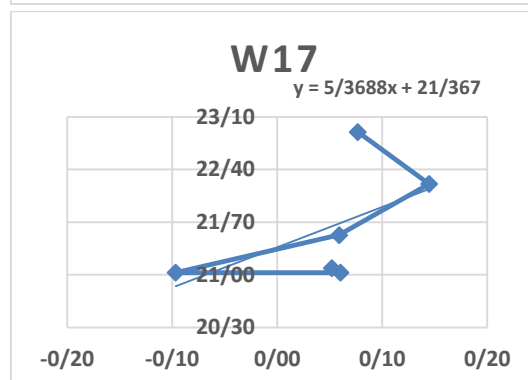
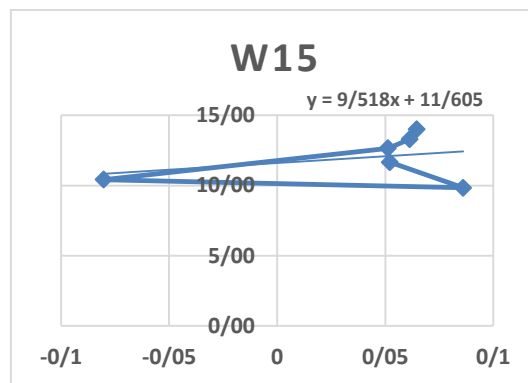
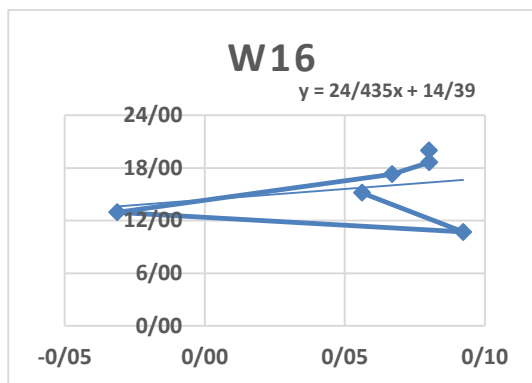
- ارائه مدلی برای آب‌های زیرزمینی به‌منظور بررسی سناریوهای مختلف، به‌طور مثال در صورت کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی نرخ فرونشست با چه سرعتی کاهش می‌یابد
- دخیل نمودن شاخص‌ها و سناریوهای اقلیمی و تأثیر آن‌ها بر فرونشست و پیش‌بینی تغییرات فرونشست در آینده با استفاده از آن‌ها
- انجام مطالعاتی در راستای تخصیص بهینه آب و همچنین بهینه‌سازی و تغییر الگوی کشت منطقه

نمودارهای تنش- کرنش چاه‌های پیزومتری دشت سملقان

نمودارهای تنش کرنش کلیه چاه‌های پیزومتری با قرارگیری مقدار فرونشست (+) بر روی محور X و مقدار متوسط سطح آب بر روی محور Y ترسیم شده، معکوس شیب خط برازش داده شده مقدار ضریب ذخیره حدودی در نقطه موردنظر است. در این قسمت تمامی نمودارهای ترسیم شده قرار داده شده‌اند.

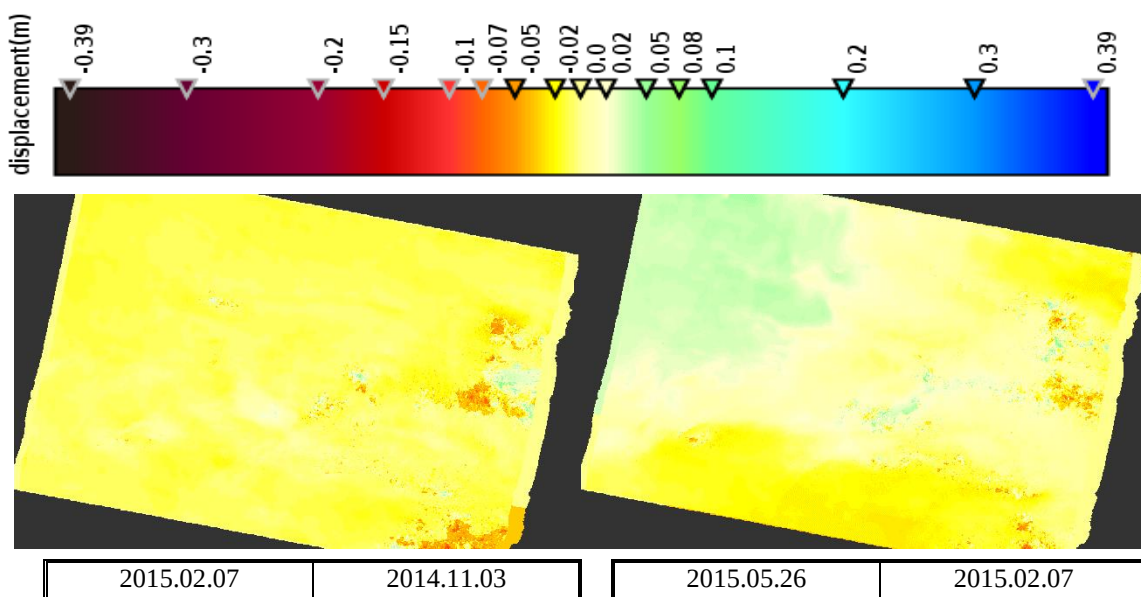


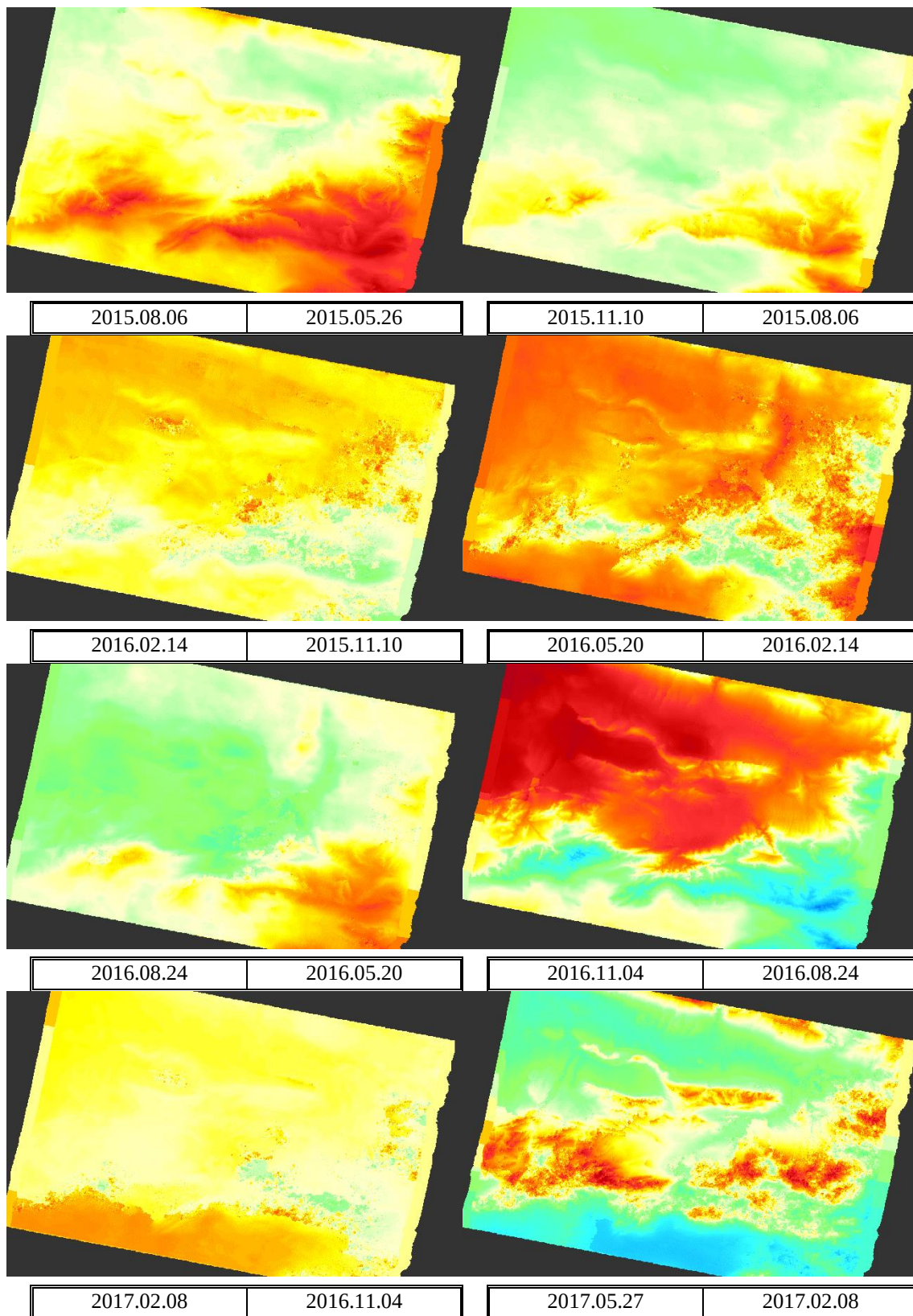


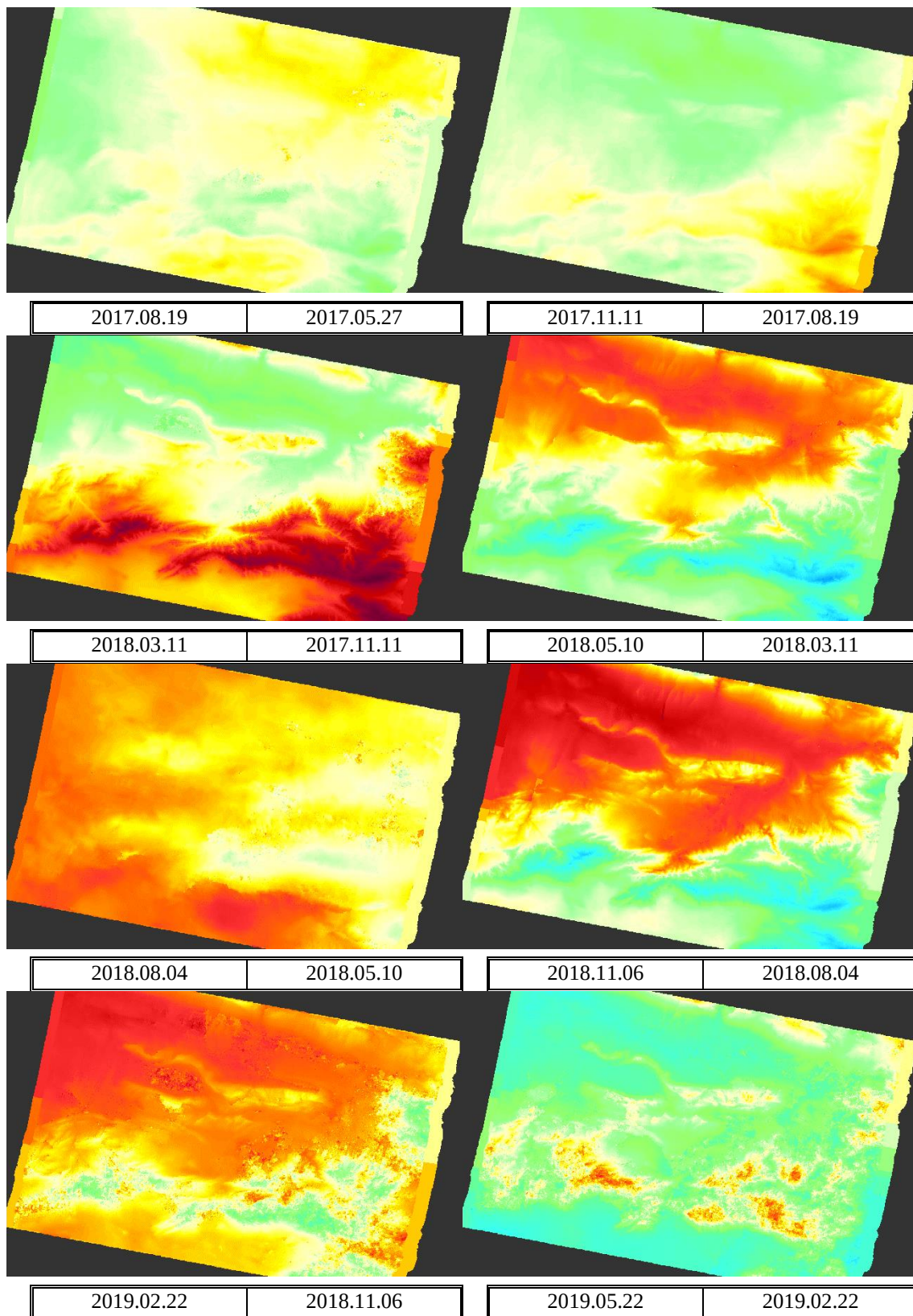


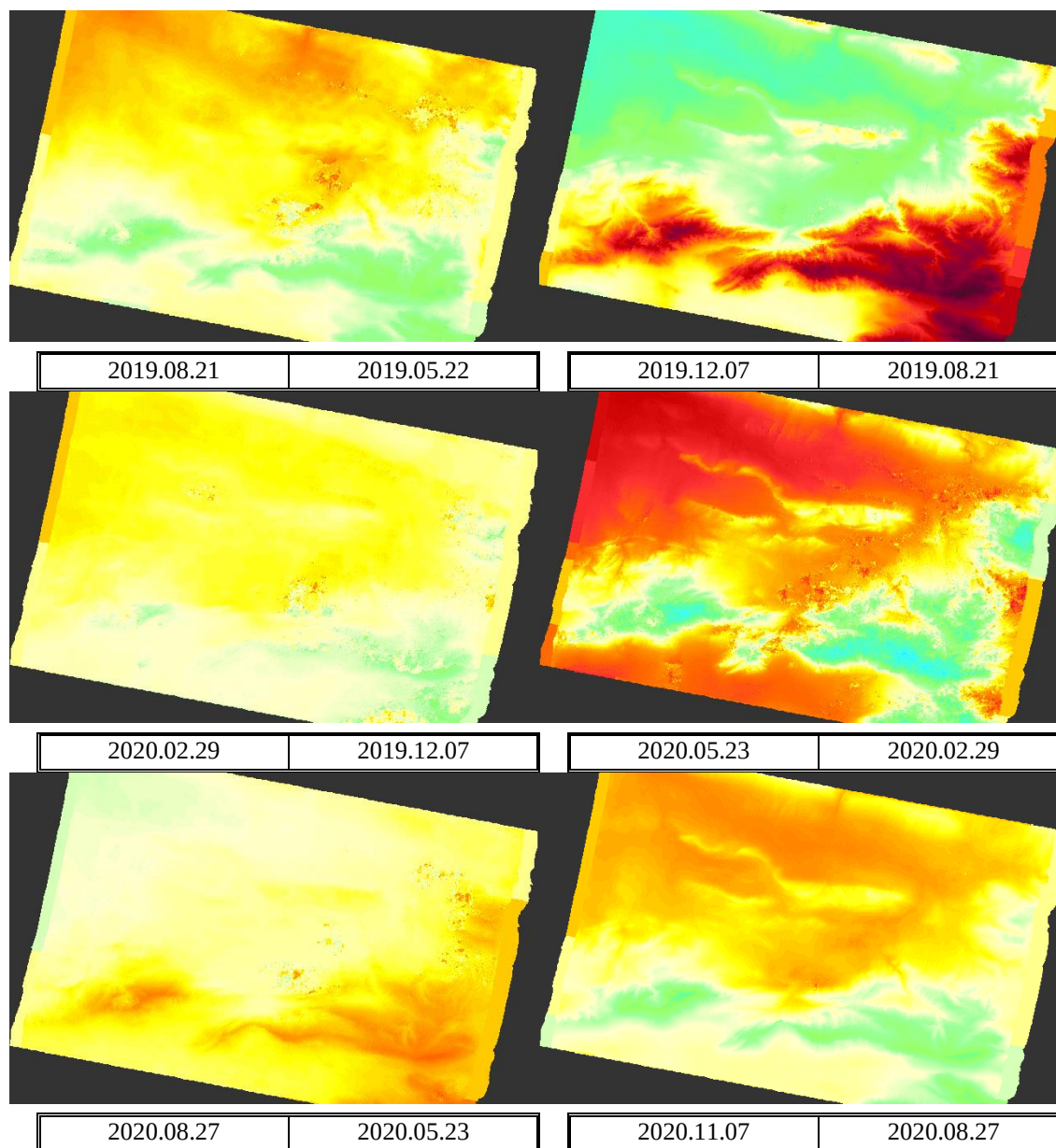
نقشه‌های جابه‌جایی

در این بخش تمامی نقشه‌های جابه‌جایی پایین گذر با ذکر تاریخ تصاویر ذکر شده‌اند. تاریخ سمت چپ مربوط به تصویر اصلی و تاریخ سمت راست مربوط به تصویر پیرو می‌باشند.





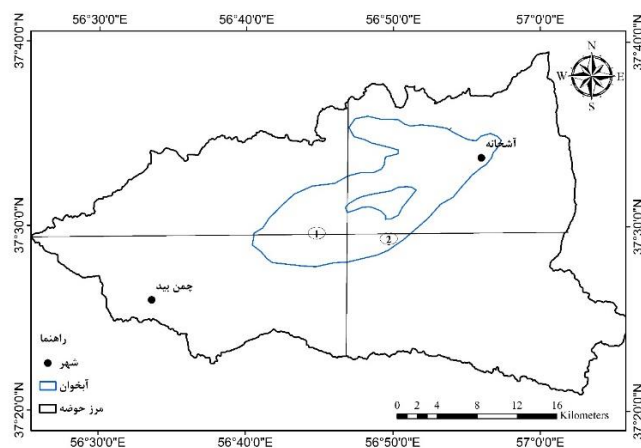




پلات‌های جابه‌جایی

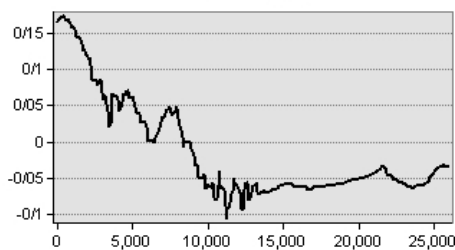
در این بخش دو مقطع در راستاهای اصلی دشت سملقان بر روی نقشه‌های جابه‌جایی تجمعی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ ترسیم شده است. موقعیت مقاطع در شکل زیر قابل مشاهده است. پلات‌های جابجایی تحلیل فضایی-زمانی فرونشست را امکان‌پذیر کرده، به بیننده امکان درک میزان جابه‌جایی را در جهات و موقعیت‌های مختلف فراهم می‌کنند. پلات‌های ترسیمی نشان‌دهنده افزایش عمومی فرونشست از جنوب به شمال دشت و از غرب به شرق هستند. همچنین تغییر الگوی رفتاری فرونشست در پلات‌های ۲۰۱۷ نسبت به دیگر سال‌ها و رفتار بازگشت‌پذیر زمین در آبخوان به وضوح قابل‌رویت

است.

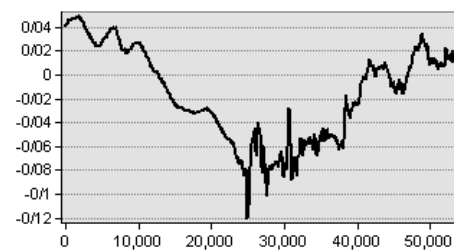


موقعیت مقاطع جهت ترسیم پلات دشت سملقان

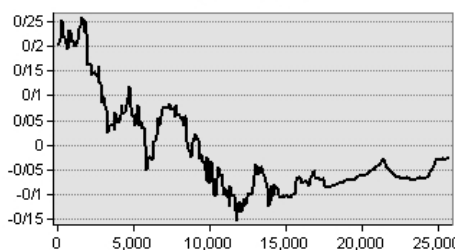
جنوب به شمال - ۲۰۱۵



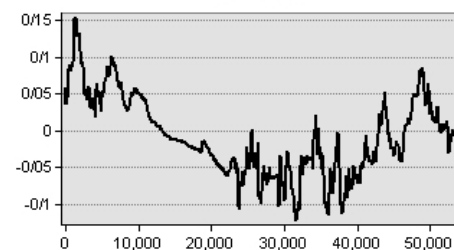
غرب به شرق ۲۰۱۵



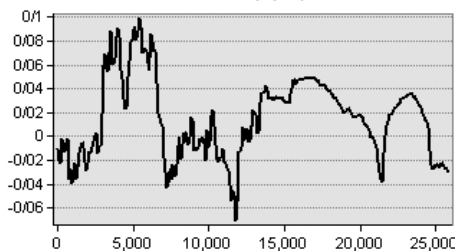
جنوب به شمال ۲۰۱۶



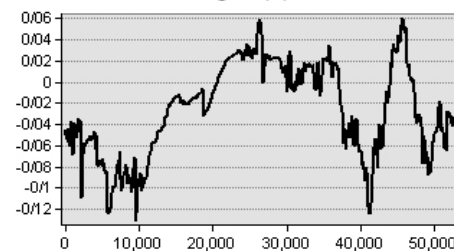
غرب به شرق ۲۰۱۶

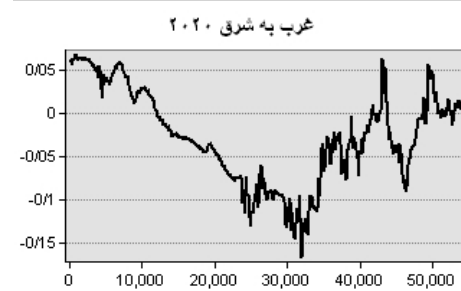
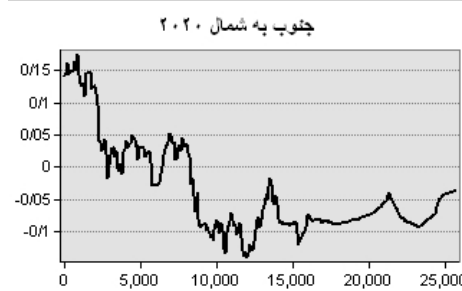
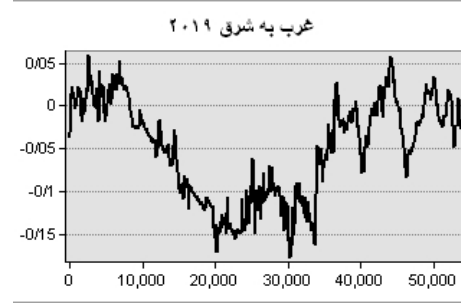
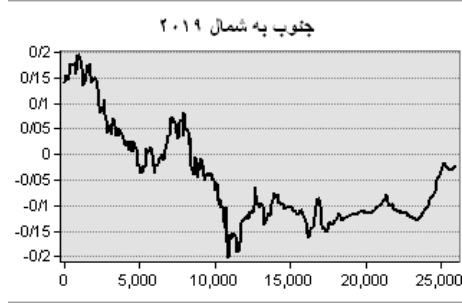
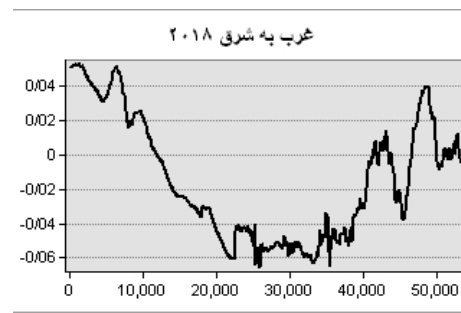
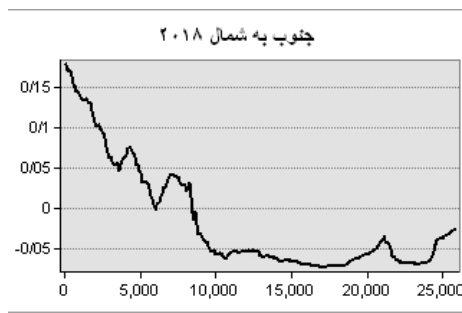


جنوب به شمال ۲۰۱۷



غرب به شرق ۲۰۱۷





مراج

- [1] Custodio, E. (2002) "Aquifer overexploitation: what does it mean?" *Hydrogeology journal*, 10(2), pp 254-277.
- [2] Feng, Q. Y., Liu, G. J., Lei, M. E. N. G., Fu, E. J., Zhang, H. R., & Zhang, K. F. (2008) "Land subsidence induced by groundwater extraction and building damage level assessment—a case study of Datun, China" *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(4), pp 556-560.
- [3] Thu, T. M., & Fredlund, D. G. (2000) "Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam" *Canadian Geotechnical Journal*, 37(3), pp 621-637.
- [4] بابایی س.، موسوی ز. و روستاییم. آ. (۱۳۹۵) "آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین"، علوم و فنون نقشه برداری، شماره ۴، دوره ۵.
- [5] شریفی کیا م. (۱۳۹۱) "تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق - بهرمان"، برنامه ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، شماره ۳، دوره ۱۶.
- [6] آمیغ پیم، عربی س. و طالبی ع. (۱۳۸۹) "بررسی فرونشست یزد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و ترازبایی دقیق"، علوم زمین، شماره ۷۷، دوره ۲۰.
- [7] جوان نیکخواه ش. (۱۳۹۶) پایان نامه ارشد: "ارزیابی داده‌های راداری سنتینل-۱ در برآورد فرونشست زمین؛ مطالعه موردی حدفاصل داراب و فسا"، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز.
- [8] روزبان ع. (۱۳۹۵) "بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) و با بکار گیری تصاویر سنجنده جدید SENTINEL"، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.
- [9] Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016) "Persistent scatterer interferometry: A review" *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, pp 78-89.
- [10] Alley, W. M., Healy, R. W., LaBaugh, J. W., & Reilly, T. E. (2002) "Flow and storage in groundwater systems" *science*, 296(5575), pp 1985-1990.
- [11] Famiglietti, J. S. (2014) "The global groundwater crisis" *Nature Climate Change*, 4(11), pp 945-948.
- [12] اکبریم، جرگه م. و مدنی سادات ح. (۱۳۸۸) "بررسی افت سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) (مطالعه موردی: آبخوان دشت مشهد)" پژوهش‌های حفاظت آب

و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، شماره ۴، دوره ۱۶.

[13] Ezquerro, P., Guardiola-Albert, C., Herrera, G., Fernández-Merodo, J. A., Béjar-Pizarro, M., & Bonì, R. (2017) "Groundwater and subsidence modeling combining geological and multi-satellite SAR data over the alto guadalentín aquifer (SE Spain)" *Geofluids*, 2017.

[14] شاهی دشت ع. و عباس نژاد ا. (۱۳۹۰) "ارزیابی اثرات زیست محیطی تخلیه سفره آب زیرزمینی دشت جیرفت و پیش بینی شرایط در آینده (یادداشت فنی)"، تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۱، دوره ۷.

[15] Barlow, P. M., & Reichard, E. G. (2010) "Saltwater intrusion in coastal regions of North America" *Hydrogeology Journal*, 18(1), 247-260.

[16] Famiglietti, J. S., Lo, M., Ho, S. L., Bethune, J., Anderson, K. J., Syed, T. H. & Rodell, M. (2011) "Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley" *Geophysical Research Letters*, 38(3).

[17] صفاری ا.، جعفری ف. و توکلی صبور س. (۱۳۹۵) "پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت کرج - شهریار" پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۲، دوره ۵: ص ۸۲.

[18] Béjar-Pizarro, M., Ezquerro, P., Herrera, G., Tomás, R., Guardiola-Albert, C., Hernández, J. M. R. & Martínez, R. (2017) "Mapping groundwater level and aquifer storage variations from InSAR measurements in the Madrid aquifer, Central Spain" *Journal of Hydrology*, 547, pp 678-689.

[19] Burbey, T. J., & Zhang, M. (2015) "Inverse modeling using PS-InSAR for improved calibration of hydraulic parameters and prediction of future subsidence for Las Vegas Valley, USA" *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, pp 411-416.

[20] Gao, M., Gong, H., Chen, B., Li, X., Zhou, C., Shi, M. & Duan, G. (2018) "Regional land subsidence analysis in eastern Beijing plain by insar time series and wavelet transforms" *Remote Sensing*, 10(3), 365.

[21] <https://Usgs.gov/>

[22] Mousavi, S. M., Shamsai, A., Naggar, M. H. E., & Khamsehchian, M. (2001) "A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran" *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3), pp 452-464.

[23] آل خمیس ر.، کریمی نسب س. و آریانا ف. (۱۳۸۵) "بررسی تأثیر نشست حاصل از تخلیه آب زیرزمینی بر تخریب لوله جدار"، آب و فاضلاب، شماره ۴، دوره ۱۷.

[24] <http://nez.azwater.gov/>

[25] Moradi, A., Emadodin, S., Arekhi, S., & Rezaei, K. (2020) "Earth subsidence analysis using radar interferometry technique, geotechnical and piezometric wells (case study: Urban region 18 Tehran)"

[26] خسروپناه ا.، کرمی غ. و جیحونی س. (۱۳۹۰) "تاثیرات برداشت بیرویه از آبهای زیرزمینی و پدیده فرونشست در دشت سملقان"، هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران. دانشگاه صنعتی شاهرود.

[27] Rezaei, A., & Mousavi, Z. (2019) "Characterization of land deformation, hydraulic head, and aquifer properties of the Gorgan confined aquifer, Iran, from InSAR observations" *Journal of Hydrology*, 579, pp 124-196.

[28] Hu, R. L., Yue, Z. Q., Wang, L. U., & Wang, S. J. (2004) "Review on current status and challenging issues of land subsidence in China" *Engineering Geology*, 76(1-2), pp 65-77.

[29] آمیغ پی م.، عربی س.، طالبی ع. و جموری. (۱۳۸۸) "کاربرد تکنیک تداخل سنجی راداری در مطالعات مناطق فرونشست"، همایش ژئوماتیک.

[30] روستایی ش.، و جباری ا. (۱۳۸۵) "ژئومورفولوژی مناطق شهری"، چاپ ششم، نشر سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاهها، ایران.

[31] عقیقم. (۱۳۹۵) "ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن (مطالعه موردی: دشت سیدان فاروق مروت)" پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۳، دوره ۵.

[32] ندیری ع.، طاهری ز.، برزگری ق. و دیده بان خ. (۱۳۹۷) "ارائه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک"، تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۲، دوره ۱۴.

[33] لشکری پور غ.، غفوریم. و رستمی بارانی. (۱۳۸۷) "بررسی علل تشکیل شکاف‌ها و فرونشست زمین در غرب دشت کاشمر"، دوفصلنامه رخساره‌های رسوبی، شماره ۱، دوره ۱.

[34] یمانی م.، نجفی ا. و عابدینیم. (۱۳۸۸) "ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت قره بلاغ استان فارس" جغرافیا، شماره ۸-۹، دوره ۳.

[35] Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011) "Regional land subsidence accompanying groundwater extraction" *Hydrogeology Journal*, 19(8), pp 1459-1486.

[36] Guzy, A., & Malinowska, A. A. (2020) "State of the art and recent advancements in the modelling of land subsidence induced by groundwater withdrawal" *Water*, 12(7), 2051.

[37] Gehman, C. L., Harry, D. L., Sanford, W. E., Stednick, J. D., & Beckman, N. A. (2009) "Estimating specific yield and storage change in an unconfined aquifer using temporal gravity surveys" *Water Resources Research*, 45(4).

[38] Hammond, W. C., Burgette, R. J., Johnson, K. M., & Blewitt, G. (2018) "Uplift of the western transverse ranges and Ventura area of Southern California: A four-technique geodetic study combining GPS, InSAR, leveling, and tide gauges" *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1), pp 836-858.

[39] Hammond, W. C., Burgette, R. J., Johnson, K. M., & Blewitt, G. (2018) "Uplift

of the western transverse ranges and Ventura area of Southern California: A four-technique geodetic study combining GPS, InSAR, leveling, and tide gauges" *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1), pp 836-858.

[40] Teatini, P., Gambolati, G., Ferronato, M., Settari, A. T., & Walters, D. (2011) "Land uplift due to subsurface fluid injection" *Journal of Geodynamics*, 51(1), pp 1-16.

[41] Chatterjee, R. S., Fruneau, B., Rudant, J. P., Roy, P. S., Frison, P. L., Lakhera, R. C. & Saha, R. (2006) "Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) technique" *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2), pp 176-185.

[42] Kleinhans, I., & Van Rooy, J. L. (2016) "Guidelines for sinkhole and subsidence rehabilitation based on generic geological models of a dolomite environment on the East Rand, South Africa" *Journal of African Earth Sciences*, 117, pp 86-101.

[43] حق شناسم، شعاعی غ. و ریاحی م. (۱۳۹۵) "شبیه سازی فرونشست زمین به علت افت آب زیرزمینی به روش امان محدود در منطقه شهریار (گمانه بردآباد)"، چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری.

[44] <https://www.ncc.gov.ir/>

[45] Strozzi, T., Luckman, A., Murray, T., Wegmuller, U., & Werner, C. L. (2002) "Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), pp 2384-2391.

[46] صادقی ز، ولدان زوجم. ج. و دهقانیم. (۱۳۹۱) "معرفی و مقایسه دو روش تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده دائمی به منظور اندازه گیری فرونشست زمین (مطالعه موردی: جنوب غربی دشت تهران)"، سنجش از دور و GIS ایران، شماره ۱، دوره ۴.

[47] Crosetto, M., Solari, L., Mróz, M., Balasis-Levinsen, J., Casagli, N., Frei, M. & Andersen, H. S. (2020) "The evolution of wide-area dinsar: From regional and national services to the European ground motion service" *Remote Sensing*, 12(12), 2043.

[48] Showstack, R. (2014) "Sentinel satellites initiate new era in earth observation"

[49] Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011) "A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR" *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 49(9), pp 3460-3470.

[50] Gualandi, A., Serpelloni, E., & Belardinelli, M. E. (2014) "Space-time evolution of crustal deformation related to the M w 6.3, 2009 L'Aquila earthquake (central Italy) from principal component analysis inversion of GPS position time-series" *Geophysical Journal International*, 197(1), pp 174-191.

[51] Wnuk, K., & Wauthier, C. (2017) "Surface deformation induced by magmatic processes at Pacaya Volcano, Guatemala revealed by InSAR" *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344, pp 197-211.

[52] Bayer, B., Simoni, A., Schmidt, D., & Bertello, L. (2017) "Using advanced InSAR techniques to monitor landslide deformations induced by tunneling in the Northern Apennines, Italy" *Engineering Geology*, 226, pp 20-32.

- [53] Brown, S., & Nicholls, R. J. (2015) "Subsidence and human influences in mega deltas: the case of the Ganges–Brahmaputra–Meghna" *Science of the Total Environment*, 527, pp 362-374.
- [54] Solari, L., Ciampalini, A., Raspini, F., Bianchini, S., & Moretti, S. (2016) "PSInSAR analysis in the Pisa urban area (Italy): A case study of subsidence related to stratigraphical factors and urbanization" *Remote Sensing*, 8(2), pp 120.
- [55] لاش د.بی. (۱۳۹۲) "مبانی سنجش آر دور مایکروویو (تداخل سنجی راداری) با تاکید بر علوم زمین ژئومورفولوژی، ژئوفیزیک، ژئولوژی"، فرزانه س.، نظام محله م.ع.، حاجی زاده ع.آل.، رضایی ه.، رستگار ع. چاپ اول، انتشارات ماهواره.
- [56] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001) "Permanent scatterers in SAR interferometry" *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), pp 8-20.
- [57] Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & 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.
- [58] آجورلو پ. و سمیعی اصفهانی س. (۱۳۹۷) "ارزیابی پدیده فرونشست ناشی از مکانیزم های محلی در شهر تهران در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ با استفاده از تداخل سنجی راداری ماهواره Sentinel-1a"، بیست و پنجمین همایش و نمایشگاه ملی ژئوماتیک و سومین کنفرانس مهندسی فناوری اطلاعات مکان.
- [59] Tofani, V., Raspini, F., Catani, F., & Casagli, N. (2013) "Persistent Scatterer Interferometry (PSI) technique for landslide characterization and monitoring" *Remote Sensing*, 5(3), pp 1045-1065.
- [60] Othman, A. A., Al-Maamar, A. F., Al-Manmi, D. A. M., Liesenberg, V., Hasan, S. E., Al-Saady, Y. I., ... & Khwedim, K. (2019) "Application of DInSAR-PSI technology for deformation monitoring of the Mosul dam, Iraq" *Remote Sensing*, 11(22), pp 2632.
- [61] محمدخانش.، گنجائیان ش.، گروسی ل. و زنگنه تبار ز. (۱۳۹۸) "ارزیابی تأثیر افت آب های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱؛ محدوده مورد مطالعه: دشت قروه"، پرتال جامع علوم انسانی، شماره ۱۱۲، دوره ۲۸.
- [62] شکریم. و صاحبیم. (۱۳۹۶) "تلفیق تصاویر رادار با روزنه مجازی و اپتیک با استفاده از تبدیل کرولت"، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، شماره ۲. دوره ۷: ص ۱۲۷.
- [63] اکبری قوچانی ح. (۱۳۹۸) پایان نامه کارشناسی ارشد: "ارزیابی فرونشست زمین با استفاده از داده های سری زمانی تداخل سنجی راداری"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [64] <https://www.unavco.org/>
- [65] Motagh, M., Haghighi, M., Shamshiri, R., & Esmaili, M. (2015) "Comparison of X-Band, L-Band and C-Band Radar Images in Monitoring Subsidence in Agricultural Regions" *FRINGE 2015*, 731, pp 18.

- [66] Maghsoudi, Y., van der Meer, F., Hecker, C., Perissin, D., & Saepuloh, A. (2018) "Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia" *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, pp 386-396.
- [67] <http://www.esa.int/>
- [68] Torres, R., Snoeijs, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E. & Rostan, F. (2012) "GMES Sentinel-1 mission" *Remote Sensing of Environment*, 120, pp 9-24.
- [69] میراثی س. و رهنما ح. (۱۳۹۵) "تحلیل و ارزیابی پارامترهای مؤثر بر فرونشست زمین"، مهندسی عمران مدرس، شماره ۱، دوره ۱۶: ص ۴۵.
- [70] Maheswaran, G., Selvarani, A. G., & Elangovan, K. (2016) "Groundwater resource exploration in Salem district, Tamil Nadu using GIS and remote sensing" *Journal of Earth System Science*, 125(2), pp 311-328.
- [71] شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی، (۱۳۹۵) "طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب"
- [72] بشارتی برسری س.، ملک پورا. و شفیع‌ی ثابت ب. (۱۳۹۷) "مدل سازی عددی تأثیر پمپاژ آب زیرزمینی و بارگذاری خاک بر فرونشست زمین (مطالعه موردی: منطقه سراوان-استان گیلان)"، هفدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران.
- [73] Miller, M. M., Jones, C. E., Sangha, S. S., & Bekaert, D. P. (2020) "Rapid drought-induced land subsidence and its impact on the California aqueduct" *Remote Sensing of Environment*, 251, pp 112063.
- [74] Ge, L., Ng, A. H. M., Li, X., Abidin, H. Z., & Gumilar, I. (2014) "Land subsidence characteristics of Bandung Basin as revealed by ENVISAT ASAR and ALOS PALSAR interferometry" *Remote Sensing of Environment*, 154, pp 46-60.
- [75] Ezquerro, P., Herrera, G., Marchamalo, M., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., & Martínez, R. (2014) "A quasi-elastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study" *Journal of Hydrology*, 519, pp 1192-1204.
- [76] Zhang, Y., Liu, Y., Jin, M., Jing, Y., Liu, Y., Liu, Y. & Chen, Y. (2019) "Monitoring land subsidence in Wuhan city (China) using the SBAS-InSAR method with radarsat-2 imagery data" *Sensors*, 19(3), pp 743.
- [77] Fárová, K., Jelének, J., Kopačková-Strnadová, V., & Kycl, P. (2019) "Comparing DInSAR and PSI techniques employed to Sentinel-1 data to monitor highway stability: A case study of a massive dobkovičky landslide, Czech Republic" *Remote Sensing*, 11(22), pp 2670.
- [78] Braun, A., Hochschild, V., Pham, G. T., Nguyen, L. H. K., & Bachofer, F. (2020) "Linking land subsidence to soil types within Hue city in Central Vietnam" *Journal of Vietnamese Environment*, 12(1), 1-6.
- [79] Pawluszek-Filipiak, K., & Borkowski, A. (2020) "Comparison of PSI and DInSAR approach for the subsidence monitoring caused by coal mining exploitation" *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and*

Spatial Information Sciences, 43, pp 333-337.

[80] Cigna, F., & Tapete, D. (2020) "Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR" *Remote Sensing of Environment*, 253, pp 112161.

[81] بابایی س.، موسوی س. و روستائیم. آ. (۱۳۹۹) "آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین"، نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، شماره ۴، دوره ۵: ص ۹۵.

[82] بهادران ب. (۱۳۷۱) "درزها و شکافهای دشت مہیار"، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۴، دوره ۷.

[83] شمشکی ا.، محمدی ی. و بلورچی م. (۱۳۹۰) "شناسایی پهنه آبخوان تحت فشار و نقش آن در شکل‌گیری فرونشست زمین در دشت هشتگرد"، علوم زمین، شماره ۷۹، دوره ۲۰.

[84] خسروپناه ا.، کرمی غ. و جیحونی س. (۱۳۹۰) "تاثیرات برداشت بیرویه از آبهای زیرزمینی و پدیده فرونشست در دشت سملقان"، هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران.

[85] میرشاهی ف.ا.، ولدان زوجم. ج.، دهقانی، هاشمی امین آبادی س.م. (۱۳۹۲) "اندازه‌گیری فرونشست سطح زمین به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری با استفاده از تصاویر TerraSAR-X"، همایش ملی ژئوتکنیک، دوره ۲۰.

[86] Dehghani, M. (2014) "An enhanced algorithm based on radar interferometry for monitoring land subsidence caused by over-exploitation of groundwater" *Engineering Journal of Geospatial Information Technology*, 2(2), pp 61-73.

[87] صفاری ا.، جعفری ف.، توکلی صبور س.م. (۱۳۹۵)، "پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت کرج - شهریار پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی" شماره ۲، دوره ۱۸

[88] داوودی جم. و کمال آبادی فراهانی. ح. (۱۳۹۶) "کاربرد روش طول باز کوتاه تداخل سنجی راداری در تشکیل سری زمانی فرونشست زمین (مطالعه موردی: دشت مہیار اصفهان)" چهارمین کنفرانس ملی کاربرد سامانه اطلاعات مکانی GIS در صنعت آب و برق.

[89] احمدی ن.، موسوی ز. و معصومی ز. (۱۳۹۷) "مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن" سنجش از دور و GIS ایران، شماره ۳، دوره ۳۹

[90] خرمیم، ابریشمی س. و مقصودی ی. (۱۳۹۸) "تعیین فرونشست شهر مشهد به روش تداخل سنجی راداری پراکنشگر دائمی"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، شماره ۶، دوره ۵۱، صفحه ۱۰

[91] کرمی ر. و آبادیم. (۱۳۹۸) "بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی SAR (DInSAR) در شمال استان اصفهان" دومین همایش ملی مدیریت منابع طبیعی با محوریت آب،

سیل و محیط زیست.

[92] شفیعی ن.، گلی مختاری ل.، امیراحمدی ابوالقاسم. و زندی ر. (۱۳۹۹) "بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری" فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۴، دوره ۸: صفحه ۹۳-۱۱۱.

[93] صالحی متعهد ف.، حافظی مقدس ن.، لشکری پور غ.ر. و دهقانیم. (۱۳۹۸) "ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد" نشریه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، شماره ۳، جلد ۱۳: صفحه ۴۶۲-۴۳۵.

[94] سودمندافشار ر.، احمدی س. (۱۳۹۹) "پایش فرونشست دشت‌های قروه و چهاردولی استان‌های همدان و کردستان با استفاده از فن پراکنش گرهای دائمی" شماره ۳، دوره ۶: صفحه ۲۳۳-۲۱۹.

[95] نیک اختر ح.، (۱۳۹۳) پایان نامه ارشد: "بررسی علل ایجاد شکاف‌های بزرگ در راه‌های احداث شده روی بستر خاک‌های رمبنده و ارائه راهکار جهت کاهش، تثبیت و حذف آنها در محدوده دشت سملقان استان خراسان شمالی (با رویکرد مدیریت بحران راه)"، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات شاهرود

[96] نصیری ش.، انصاری ح. و ضیایی ع.ن.، (۱۳۹۹) "شبیه‌سازی جریان رودخانه حوضه آبریز سملقان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT" فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی منابع آب، شماره ۴۵، دوره ۱۳، صفحه ۵۶-۳۹

[97] افشار حرب ع. (۱۳۷۳) زمین شناسی ایران: زمین شناسی کپه داغ، تهران: انتشارات سازمان زمین شناسی کشور

[98] عجم ح.ر.، محمدزاده ح.، کرمی غ.، کاظمی گلیان ر. (۱۳۹۶) "بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی آبخوان سملقان بر اساس تغییرات تحت الارضی رخساره‌های آبرفتی و سنگی رخساره‌های رسوبی" نشریه علمی-پژوهشی رخساره‌های رسوبی، شماره ۱۰، دوره ۲

[99] عجم ح. (۱۳۹۵)، پایان نامه ارشد: "بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت سملقان" دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

[100] کلانتری س.، اسدیم.، زهیری ز.، دهقان آ. (۱۳۹۴) "تعیین اقلیم شهرستان طبس با استفاده از روش‌های منحنی آمبروترمیک، ضریب خشکیدومارتن، اقلیم نمای آمبرژه" سومین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار

[101] غلامرضایی صابری و، (۱۳۹۲)، پایان نامه ارشد: "ارزیابی فعالیت گسل‌های دشت سملقان به روش تداخل سنجی راداری و توزیع فرکتال" دانشکده علوم پایه، گروه زمین شناسی، دانشگاه آزاد

اسلامی واحد شاهرود.

[102] خیریم، (۱۳۹۵)، پایان نامه ارشد: "بررسی فرونشست زمین ناشی از استخراج بی رویه آب‌های زیر زمینی در دشت سمنان با استفاده از تکنیک تصاویر راداری"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات شاهرود.

[103] Fournel, M., Blasco, J. M. D., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L. & Wong, C. (2018) "ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry" In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. pp 1364-1367

[104] Sakar, N., Brcic, R., Gonzalez, F. R., & Yague-Martinez, N. (2015) "An advanced co-registration method for TOPSAR interferometry" In *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. pp 5240-5243.

[105] Tripathi, A., & Kumar, S. (2018) "Effect of Phase Filtering on Interferometry based Displacement Analysis of Cultural Heritage Sites" In *2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*. pp. 1-5.

[106] Brunson, B. J. L. (2019) "SAR Phase Unwrapping Using Path-Based Least-Squares Phase Estimation and Region-Growing with Polynomial-Based Phase Prediction"

[107] Ferreti, A., Monti Guanrieri, C., Prati, C., Rocca, F., & Massonnet, D. (2007) "InSAR Principles—Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation"

[108] Padmanaban, R., Bhowmik, A. K., & Cabral, P. (2017) "A remote sensing approach to environmental monitoring in a reclaimed mine area" *ISPRS international journal of geo-information*, 6(12), pp 401.

[109] محمدیاری ف.، پورخباز ح.، توکلی م. و اقدر ح. (۱۳۹۳) "تهیه نقشه پوشش گیاهی و پایش تغییرات آن با استفاده از تکنیک های سنجش از دور و سیستم انتقال جغرافیایی (مطالعه موردی شهرستان بهبهان)" فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، شماره ۹۲.

[110] مقصودی ی.، امانی ر. و احمدی ح. (۱۳۹۸) "بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غربی تهران با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی" مجله تحقیقات منابع آب، شماره ۱، دوره ۱۵: ص ۲۹۹.

[111] مرادی آ.، عمادالدین س.، آرخی ص. و رضائی خ. (۱۳۹۹) "تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیزومتری (مطالعه موردی: منطقه شهری ۱۸ تهران)" تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، شماره ۷، دوره ۱، ص: ۱۵۳.

Abstract

Global climate change and overpopulation have led to an increase in groundwater demand. The risk of land subsidence due to groundwater pumping and water depletion is happening on various scales and it is one of the environmental hazards that threaten the communities. Subsidence means the collapse of the earth with a slight horizontal displacement vector. Semalghan plain is one of the agricultural plains in North Khorasan province. Based on the regional water authority organization of North Khorasan information, most groundwater resources are extracted by deep well from this plain and it has a critical situation. Radar interference techniques have attracted the attention of researchers in recent years due to their acceptable accuracy and speed of monitoring. In this study, to investigate land subsidence due to groundwater drop in Semalghan plain using radar differential interferometry technique from ascending and descending data of Sentinel-1 satellite, 35 interferometers in the range of 2014-2020 have been processed and analyzed. A comparison of ascending and descending data processing results showed the same pattern of land displacement. Groundwater level and depletion maps have been produced using GIS and their relationship with subsidence has been investigated. Also, the relationship between tectonic activities, plain geological conditions, and vegetation of the region with subsidence was studied. The result maps shown a direct relationship between water table head and subsidence. Maximum subsidence in this plain in 2019 is equal to 34 cm and a minimum of 18 cm in 2015 and 2018 is estimated. The maximum subsidence rate in the Semalghan plain was 12 cm per year and 0.32 mm per day. The average annual groundwater level drop is estimated to be 0.47 meters. Studies have shown that subsidence has occurred in areas with more fine coarse grained soil. Finally, according to the land behavior in the studying area, some suggestions have been proposed to control the subsidence.

Keywords: Subsidence, Groundwater, InSAR, Aquifer interaction, Semalghan Plain



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc.Thesis in Water Resources Engineering and Management

Land subsidence assessment and aquifer interaction using InSAR techniques (Case study: Semalghan Plain)

By: Fateme Rafiee

Supervisors:

Dr. Saeed Gharechelou

Dr. Saeed Golian

February, 2021