



Assessment of Land Subsidence due to Groundwater Exploitation by Using Differential Radar Interferometry Technique, Case Study: Qazvin Province

M. Janbaz Fotamy^{1*}, M. Kholgi², A. Abdeh Kolahchi³, and M. Roostaei⁴

Abstract

Excessive exploitation of groundwater resources has caused a decrease in the water table which as a consequence increased the phenomenon of the land-subsidence. Although, field inspection is the most accurate way to measure land subsidence and water table variation, it is less attractive due to the fact that they are costly and time consuming. Instead, the low cost and accurate remote sensing techniques are implemented for the large scale land subsidence measurement. The purpose of this study is to quantify the land subsidence in Qazvin province by using synthetic aperture radar interferometry and evaluating the effect of the groundwater depletion and soil profile on this phenomenon. For a long time land-subsidence evaluation, the combination of the outcomes of Envisat, Alos palsar-1, and Sentinel-1 satellite data from 2003 to 2017 are employed. Water table variation of Qazvin's aquifer was studied using data from 180 piezometric wells. Annually averaged land-subsidence in this year was obtained as 39.9 mm/year for aquifer zone and 33 mm/year for Qazvin province. According to the land-subsidence zone in Qazvin province it was revealed that most of the land-subsidences occur in the aquifer area, the fine-grained layer thickness of which would be larger than other areas. The maximum extent of Land subsidence was obtained at the northern parts of Buin-Zahra and near the Takestan borderline. This area has the highest cultivated area and groundwater depletion. The results of this study showed a strong correlation between the groundwater water table variations and land subsidence values in Qazvin province.

Keywords: Land Subsidence, Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, Groundwater Exploration, Fine-Grained Layer Thickness, Qazvin Province.

Received: July 25, 2020

Accepted: October 2, 2020

بررسی فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری: مطالعه موردی استان قزوین

مهديه جانباز فوتمی^۱، مجید خلجی^۲، عبدالنبی عبده کلاهچی^۳ و مه آسا روستایی^۴

چکیده

برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی در کشور سبب افت شدید سطح ایستابی آبخوان و از بین رفتن لایه‌های آبدار زمین گردیده است که از آثار آن پدیده فرونشست می‌باشد. دقیق‌ترین راه برای آسیب‌شناسی پدیده فرونشست، عملیات صحرایی است که بسیار پرهزینه و زمان بر است. از این رو امروزه از روش جدید داده‌های سنجش از دور استفاده می‌شود که ابزاری قدرتمند، ارزان و با دقت مناسب جهت سنجش بزرگ مقیاس و سریع فرونشست می‌باشد. هدف از این پژوهش، اندازه‌گیری میزان فرونشست استان قزوین با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری و سنجش اثرات تخلیه آب زیرزمینی و لایه‌بندی خاک بر این پدیده است. جهت ارزیابی بلندمدت فرونشست از ترکیب داده‌های ماهواره‌های Envisat، Alos Palsar و Sentinel-1 از سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ استفاده شده است. تغییرات تراز سطح ایستابی آبخوان قزوین نیز با استفاده از داده‌های ۱۸۰ چاه مشاهده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش میانگین سالانه فرونشست سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ در محدوده آبخوان قزوین ۳۹/۹ میلی‌متر و در استان قزوین این مقدار کمتر و حدود ۳۳ میلی‌متر بوده است. با مشاهده محدوده فرونشست در سطح استان قزوین دیده شد بیشترین فرونشست‌ها در محدوده آبخوان رخ داده است و در آنجا ضخامت لایه ریزدانه بیشتر بوده است. همچنین بیشینه فرونشست مربوط به شمال بویین زهرا و مرز تاکستان می‌باشد که بیشترین تخلیه آب زیرزمینی و سطح زیر کشت را دارا هستند. در نهایت نتایج این پژوهش همبستگی بین افت سطح ایستابی و ضخامت لایه ریزدانه با وقوع پدیده فرونشست در استان قزوین را نشان داده است.

کلمات کلیدی: فرونشست، تداخل سنجی تفاضلی راداری، تغییرات سطح ایستابی، ضخامت لایه ریزدانه، استان قزوین.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۵/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۷/۱۱

1- Ph.D. Student of Water Resources Engineering, Irrigation & Reclamation Engrg. Dept. University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Full Professor, Irrigation & Reclamation Engrg. Dept. University of Tehran, Karaj, Iran. Email: kholghi@ut.ac.ir

3- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Tehran, Iran.

4- Geophysics Ph.D., Remote Sensing Group, Geological Survey of Iran (G.S.I), Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- استاد، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- استادیار پژوهشی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران.

۴- دکتری ژئوفیزیک، گروه سنجش از راه دور، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

نشان داد با حذف آثار جوی، وضوح عوارض سطحی افزایش یافته و برای مواردی که سطوح هندسی بزرگتر از ۲۰ میلیمتر، نتایج از دقت بالایی برخوردار بوده است.

در ایران مطالعات پدیده فرونشست در دشت‌های کشور فراگیر نبوده و در سال‌های نخستین بر اساس مشاهدات محلی و بریدگی لوله‌های جدار چاه فرونشست گزارش شده است. اولین بررسی‌های علمی فرونشست در دشت رفسنجان صورت گرفته که میزان فرونشست شدیدی داشته است. پس از آن در سایر دشت‌های ایران نظیر اردبیل، هشتگرد، تهران، اسلام شهر، یزد، اردگان، کاشمر، مشهد و غیره نیز مطالعات بررسی پدیده فرونشست انجام شده است. (Lashkaripour, 2009; Sharifikia, 2009; Ashrafianfar et al., 2010; Dehghani et al., 2010; Safari et al., 2012; Koohbanani et al., 2018; Manafi Azar, 2018; Maghsoudi et al., 2019; Haghigatmehr et al., 2019). در این میان (Mohammad Khan, 2011) به بررسی تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) پرداختند. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره Evisat ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ آهنگ فرونشست را با کمک الگوریتم خط مبنا (SBAS) در نرم‌افزار گاما^۱ و تحت عامل لینوکس بدست آوردند صحت محاسبات فرونشست را با مقایسه از ۱۸ شبکه مترکم GPS تأیید نمودند. (Amighpey et al., 2010) در یک بازه زمانی ۸ ساله به بررسی نشست دشت یزد- اردکان بر اساس مشاهدات تصاویر راداری پرداختند و نتایج را با داده‌های ترازیبی مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه، ۱۰ تصویر راداری سنجنده ASAR از ماهواره ASAR Envisat مورد استفاده قرار گرفته و سپس توسط نرم‌افزار Doris مورد پردازش شده قرار گرفت و بر این اساس نرخ بیشینه فرونشست در این دشت حدود ۱۲ سانتی‌متر مورد محاسبه قرار گرفت. برخی دیگر از مطالعات، به ارزیابی فرونشست و عوامل مؤثر بر آن چون برداشت بی‌رویه آب از آبخوان و خصوصیات خاک پرداختند (Shemshaki et al., 2008; Dehghani, 2014; Nadery et al., 2018; Akbari et al., 2019; Sodmand Afshar and Ahmadi, 2020). اگر چه همبستگی بالایی موجود میان فرونشست زمین از یک سو و کاهش تراز سطح آب زیرزمینی و تغییر در ویژگی‌های مکانیکی لایه‌های زیرسطحی از سوی دیگر تا حد زیادی شناخته شده و تلاش‌های چندی برای شناخت کامل این پدیده صورت گرفته است، ولی تاکنون مدل جامع و دقیقی از پیش بینی فرونشست ارائه نشده است (Angorani et al., 2016). از این دسته (Alipour et al., 2008) تغییرات سطح زمین در اثر برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی تهران را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای پژوهش خود از ۴۶ داده Envisat ASAR در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ بهره بیشینه فرونشست ۴۵ سانتی‌متر مشاهده

فرونشست به حرکت قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار اندکی افقی همراه باشد گفته می‌شود که در مقیاس بزرگ به صورت تدریجی و یا آنی رخ می‌دهد (Amighpey et al., 2010; USGS, 2011). فرونشست زمین می‌تواند عللی طبیعی مانند، تراکم، وجود فروچاله، از دست رفتن لایه‌های یخ اعماق زمین و آتش‌فشان داشته باشد یا در اثر فرایندهای انسانی چون زهکش، معدن و تخلیه آب‌های زیرزمینی حادث شود (Strozzi et al., 2001; Tony et al., 2005). نتایج حاصل از فرونشست زمین ممکن است سبب ضرر اقتصادی چشمگیری و خسارت گسترده‌ای در ساختمان‌ها، جاده‌ها و زیرساخت‌ها ایجاد شود (Alipour et al., 2008; Chatterjee et al., 2015). نشست زمین یک مشکل خطرناک جهانی است و روش‌های هندسی برای پایش گسترده و جدی تغییر شکل زمین مناسب نیستند. قبل از روش‌های سنجش از دور (RS¹)، مطالعات فرونشست به مشاهدات میدانی و مدل‌سازی عددی محدود می‌شد ولی امروزه تصاویر راداری برای پایش تغییر شکل زمین به صورت گسترده کاربرد دارد (Guoqing and Jingqin, 2008; Calderhead et al., 2011, Hu et al., 2014). تصاویر راداری قادر به اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین با دقت سانتی‌متر با قدرت تفکیک مکانی چند ده متر در یک مساحت ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع است و با قابلیت تفکیک زمانی بالا به عنوان یکی از بهترین روش‌های سنجش از دور جهت محاسبه تغییرات زمین شناخته می‌شود. (Massonnet and Feigl, 1998; Rott and Nagler, 2006; Ferretti et al., 2007; Hooper, 2007). در مباحث مربوط به فرونشست، Strozzi et al. (2001) پتانسیل تصاویر راداری دیافراگم مصنوعی (SAR²) در تداخل نگاشت تصاویر راداری دیافراگم مصنوعی (InSAR³) را در پایش فرونشست مناطقی چون مکزیک، ایتالیا و آلمان بررسی نمودند. آنها روش تداخل نگاشت تفاضلی (D-InSAR⁴) یک امکان مناسب برای پایش فرونشست اعلام کردند. در این روش به یک زوج تصویر راداری، تصویر اصلی^۵ و فرعی^۶ نیاز است تا تداخل نگاشت از کسر پیکسل‌های فاز دو تصویر به دست آید. این دو تصویر در زمان‌های مختلف از یک منطقه مشترک برداشت می‌شوند. (Calderhead et al., 2010) به بررسی فرونشست زمین در اثر برداشت بی‌رویه از آبخوان در مکزیک پرداختند. آن‌ها با استفاده از ۳۰ تصویر SAR از سنجنده‌های مختلف در باند C به این نتیجه رسیدند که خط مبنا در Envisat ASAR نسبت به RADARSAT1 کوچک‌تر است و در این مطالعه بیشترین فرونشست بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸، ۴۰ سانتی‌متر تخمین زده شد. (Gong et al., 2014) در پایان‌نامه دکتری خود به بررسی طولانی مدت تغییرات شکلی سطح زمین بر اساس تصاویر SAR پرداخت و نتایج این مطالعه

Mirhashemi et al. (2018) تغییرات عمق آبخوان در محدوده شبکه قزوین و عوامل انسانی و طبیعی مؤثر بر آن را از سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ بررسی نمودند و افت سالانه ۱/۵ متر در دشت قزوین را گزارش نمودند. آن‌ها عمده دلیل افت سطح ایستابی را کاهش بارندگی، کاهش آب‌های سطحی و برداشت از چاه‌های کشاورزی بیان نمودند. Babae et al. (2020) با استفاده از داده‌های ماهواره Envisat به ارزیابی فرونشست دشت قزوین از روش سری زمانی و PS در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ و ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ پرداخته و میانگین فرونشست در دشت قزوین را ۴۰ میلی‌متر در سال گزارش نموده‌اند.

با توجه به سابقه مطالعاتی، فقدان بررسی تغییرات فرونشست در استان قزوین، به عنوان یک دشت ممنوعه که سالانه افت تراز سطح ایستابی بیش از یک و نیم متر دارد، دیده می‌شود. هدف انجام این تحقیق، محاسبه فرونشست بر اساس داده‌های ماهواره‌ای Alos, Envisat, Palsar-1 و Sentinel-1 به صورت دراز مدت از سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ در استان قزوین می‌باشد. همچنین تغییرات تراز سطح ایستابی آبخوان قزوین نیز با استفاده از داده‌های ۱۸۰ چاه مشاهده‌ای به صورت بلند مدت از سال‌های ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۷ بررسی شد و جنس لایه‌بندی خاک و ضخامت لایه‌های ریزدانه نیز در سطح آبخوان قزوین مورد بررسی قرار گرفت. در انتها با تفکیک و مقایسه میزان فرونشست در محیط آبخوان و در سطح استان قزوین، وجود یا عدم وجود ارتباط بین فرونشست و نوسانات سطح ایستابی و ضخامت لایه‌ریزدانه مورد سنجش قرار گرفته است.

۲- جمع‌آوری داده

جهت ارزیابی فرونشست از داده‌های ماهواره راداری Envisat ASAR, ALOS PALSAR-1 و Sentinel-1a استفاده شده است. داده‌های Envisat ASAR با ارائه طرح پژوهشی از مرکز فضایی اروپا دریافت شده و داده‌های ALOS PALSAR-1 و Sentinel-1a از سایت مرکز فضایی ژاپن دریافت گردید. مشخصات سنجنده‌های راداری استفاده شده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

شد. همچنین نتایج به‌دست آمده با داده‌های میدانی ترازبایی و GPS مورد مقایسه قرار گرفته و تطابق کامل را نشان داده است. همچنین Sharifikia (2012) به مطالعه فرونشست در دشت نوق- بهرمان به روش آزمایشگاهی- پیمایشی پرداخته است. در این مطالعه سری زمانی داده‌های راداری ماهواره اروپایی Envisat ASAR سنجنده ASAR در باند C و ماهواره ژاپنی ALOS PALSAR در باند L توسط نرم‌افزار ENVI Sarscape پردازش شدند و در نهایت نتایج حاصله با انجام عملیات پیمایشی و میدانی بر اساس ابزار GPS مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت بررسی علل فرونشست، داده‌های زمین‌شناسی سطحی و تحت‌الارضی، کاربری اراضی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داده که به ازای ۲/۳ سانتی‌متر افت سطح آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه، ۱ سانتی‌متر فرونشست حاصل شده است که با توجه به تغییرپذیری و دامنه نشست، برداشت آب‌زیرزمینی به عنوان عامل ایجابی و همچنین بارش به عنوان عمل بهبوددهنده بوده است. Hajeb et al. (2019) با کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری و آنالیز سری زمانی SBAS، نرخ فرونشست سالانه دشت استان قم را در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ با استفاده از داده‌های ماهواره Envisat ASAR برآورد نمودند. سپس با استفاده از داده‌های تغییرات تراز سطح ایستابی، ضخامت لایه‌های آبدار و ضخامت لایه‌های ریزدانه، دلایل فرونشست را با مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها عواقب برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و اثر آن بر فرونشست را نشان می‌دهد. Angorani et al. (2016) با بررسی فرونشست دشت جنوب تهران تلاش نمودند زمان تأخیر^۹ برداشت از آبخوان با وقوع فرونشست را ارزیابی نمایند. در لایه‌های آبرفتی با کاهش تراز آب زیرزمینی، فشار آب منفذی کاهش و تنش مؤثر افزایش می‌یابد و فرونشست ایجاد می‌شود. معمولاً کاهش فشار آب منفذی و افزایش تنش مؤثر زمان‌بر است و این زمان تأخیر بر طبق نظر برخی از پژوهشگران از چند ماه تا چند سال متغیر است. آن‌ها در مطالعه خود به همبستگی بالا میان فرونشست زمین از یک سو و کاهش تراز سطح آب زیرزمینی و تغییر در ویژگی‌های مکانیکی لایه‌های زیر سطحی از سوی دیگر رسیدند و تأخیر زمانی میان برداشت آب زیرزمینی و فرونشست جنوب تهران را ۲۷ ماه محاسبه نمودند. همچنین در مطالعات دشت قزوین

Table 1- Specifications of the radar sensors
جدول ۱- مشخصات سنجنده‌های راداری مورد استفاده

name of satellite	Space agency	Design life	Spatial resolution (m)	Repeat pass (days)	Active antenna
Envisat ASAR	ESA	2002-2012	30	35	C
ALOS PALSAR-1	JAXA	2003-2011	25	46	L
Sentinel-1a	ESA	2014	5×20	12	C

آبخوان قزوین به صورت کاسه‌ای بوده و آب‌های سطحی و زیرزمینی وارد آن می‌شوند سپس از غرب به شرق و شمال به جنوب حرکت کرده و در نهایت از قسمت شرقی که یک معبر نمکی است به سمت کویر قم خارج می‌شود. شیب استان قزوین به سمت شرق بوده و از ۳٪ تا ۱٪ تغییر می‌نماید. شیب هیدرولیکی آب‌زیرزمینی در اراضی مخروط افکنه‌ای ۲۰ هزار، در اراضی میان‌دشتی به ۳ در هزار و در اراضی پایان دشتی ۱ در هزار می‌باشد. در آبخوان قزوین رقوم منحنی‌های هم قابلیت انتقال رسوبات آبرفتی بین ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ مترمربع در روز متغیر می‌باشد. بیشینه قابلیت انتقال در مرکز استان می‌باشد که علت آن افزایش ضخامت اشباع آبخوان آبرفتی در این ناحیه است. براساس اطلاعات حاصل از آزمایش پمپاژ چاه‌های اکتشافی، ضریب ذخیره در این آبخوان بین ۰/۴ تا ۲ درصد می‌باشد اما با توجه به جنس و اندازه ذرات رسوبات آبرفتی متوسط ضریب ذخیره برای این آبخوان ۶ درصد برآورد شده است. در اراضی مخروط‌افکنه‌ای استان قزوین عمق برخورد به سطح آب بیش از ۱۰۰ متر است که به سمت پایاب دشت عمق سطح آب به کمتر از ۵ متر کاهش می‌یابد. در آبخوان قزوین رقوم منحنی‌های تراز آب زیرزمینی بین ۱۱۴۷ تا ۱۸۹۷ متر متغیر می‌باشد. بیشینه تراز آب زیرزمینی با رقم ۱۸۹۷ متر مربوط به اراضی واقع در دهانه خروجی دشت ابهر-خرمدره و کمینه آن در اراضی قشلاق جیر قلدن و حدود ۱۱۴۷ متر می‌باشد. تغییرات تراز آب زیرزمینی سبب تغییرات فشار آب منفذی آبخوان است که با کاهش تراز آب فشار نیز کاهش می‌یابد که موجب افزایش تنش و رخداد فرونشست می‌شود. در صورت همگن بودن آبخوان انتظار می‌رود حداکثر افت سطح آب دارای بیشینه نرخ فرونشست باشد. اما در شرایط طبیعی آبخوان‌ها ناهمگن هستند و دانه‌بندی خاک در همه جا یکسان نیست.

جهت ارزیابی فرونشست، ۳۹ قاب تصویر در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ دریافت شد که ۹ تصویر از سنجنده Envisat ASAR، ۱۶ تصویر از سنسنده Alos Palsar و ۱۴ تصویر از سنجنده Sentinel-a می‌باشد. زوج تصاویر Sentinel با نرم‌افزار گاما مورد پردازش قرار گرفته است. جهت پردازش داده‌های Envisat ASAR و Alos Palsar از افزونه SARscape در نرم‌افزار ENVI استفاده شده است.

جهت شناخت از موقعیت جغرافیایی استان قزوین و همچنین آبخوان قزوین از گزارش آب زیرزمینی حوضه دریاچه نمک-بخش قزوین استفاده شد. داده‌های لایه‌بندی خاک نیز بر اساس داده‌های سونداژ ژئوالکترونیک از آب منطقه‌ای قزوین دریافت گردید. همچنین برای بررسی تغییرات آبخوان استان قزوین، از داده‌های ۱۸۰ چاه مشاهده‌ای در سال‌های ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۷ استفاده شده است که از شرکت مدیریت منابع آب دریافت شده است. نقشه‌های فرونشست و خصوصیات آبخوان قزوین در محیط GIS ترسیم شده و برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Grapher بهره برده شده است.

۳- منطقه مورد مطالعه موردی

استان قزوین، به عنوان دشتی که قدمت ۱۴۰۰ ساله در کشاورزی دارد و از افت بیش از حد منابع آب زیرزمینی و پدیده فرونشست رنج می‌برد، از شمال به سلسله جبال البرز محدود می‌شود و در مختصات ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. موقعیت جغرافیایی استان قزوین در شکل ۱ نمایش داده شده است.

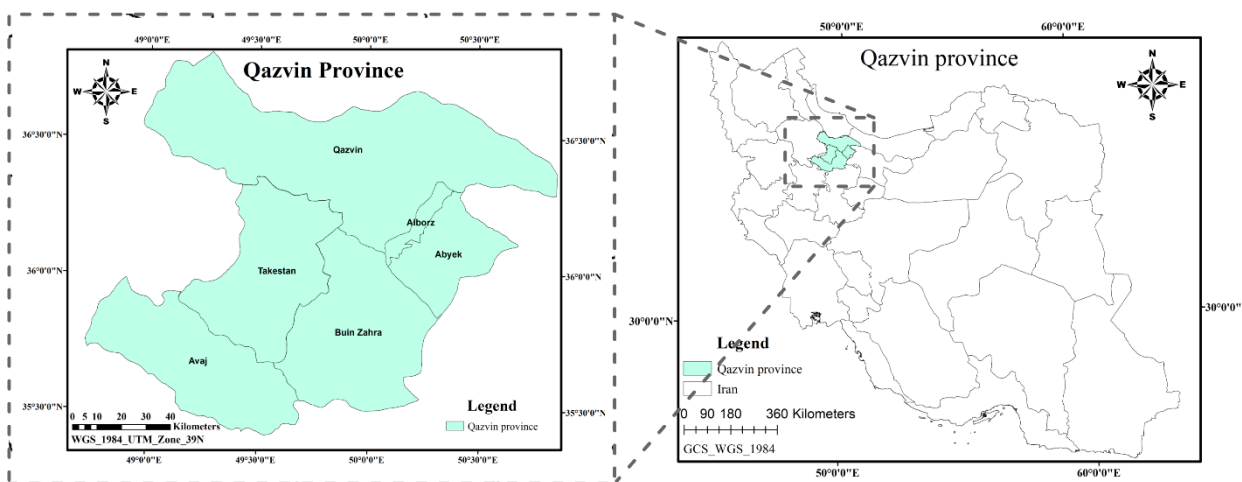


Fig. 1- Geographical location of Qazvin province
 شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان قزوین

در استان قزوین دو گسل شمال و ایپک در مرز شمال و جنوب استان قرار دارد (شکل ۲) که فعال و لرزه خیز می باشد (Ground Water Report, 2010). گسیختگی هایی خطی و حفره ای در منطقه عصمت آباد و ابراهیم آباد و جاده مواصلاتی آن دیده می شود که در شمال بویین زهرا قرار دارند (شکل ۳). در این منطقه به علت کشاورزی، سطح آب زیرزمینی بیش از سایر نقاط استان افت داشته است و پدیده لوله زایی در اطراف چاهها دیده شده است (gsi.ir).

رشد کشاورزی در استان قزوین سبب تخلیه بیش از حد مجاز آب زیرزمینی شده به طوری که از سال ۱۳۴۵ تا ۱۳۸۱ تعداد چاهها حدود ۸ برابر و میزان تخلیه از آبخوان حدود ۴/۵ برابر شده است (Ground Water Report, 2010).

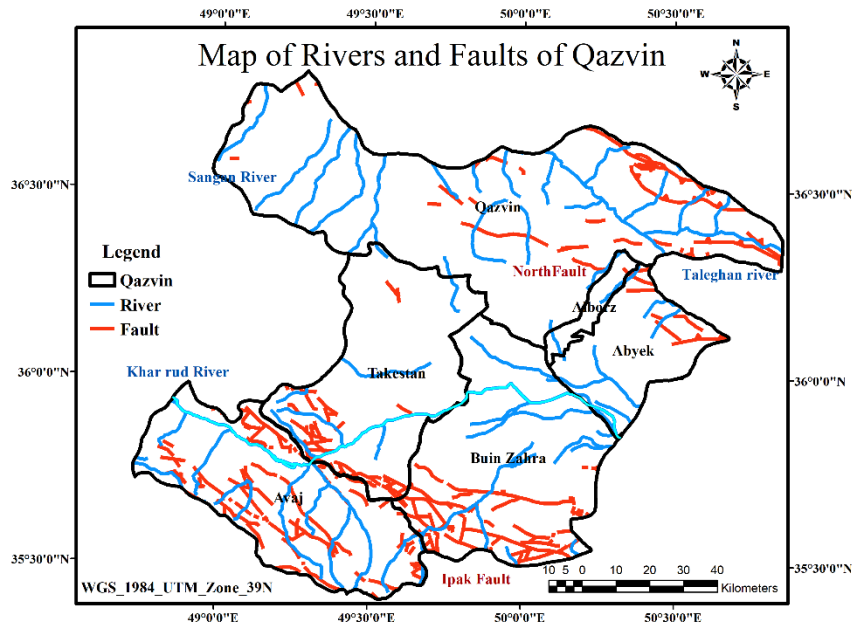


Fig. 2- Map of rivers and faults of Qazvin Province
شکل ۲- نقشه رودخانهها و گسل های استان قزوین



Fig. 3- Cracks and gaps in Khoonan village, 1 km from Buin Zahra city (gsi.ir)
شکل ۳- ترک و شکاف در روستای خونان در ۱ کیلومتری شهرستان بویین زهرا (gsi.ir)

۴- روش انجام کار

جهت ارزیابی فرونشست، تصاویر دریافتی از ماهواره‌های راداری به صورت زوج تصویرهای مناسب جهت ارزیابی فرونشست جفت شده و گام‌های پردازش D-InSAR مطابق شکل ۴ بر روی آن‌ها اعمال شده است.

با توجه به تصاویر موجود، جفت نمودن ۴۲ تصویر امکان‌پذیر بوده است ولی به علت پایین بودن همبستگی زمانی و مکانی برخی از آنها حذف و در نهایت ۳۵ زوج تصویر با همبستگی بالا انتخاب گردید. همبستگی زمانی به شکل ظاهری و ویژگی‌های پراکنشی سطح زمین و همبستگی مکانی به طول مبنای مکانی (فاصله دو ایستگاه تصویربرداری) میان دو تصویر بستگی دارد. جهت افزایش همبستگی زوج تصاویر اصلی و فرعی، تصاویر در موقعیت مکانی یکسان و در فاصله زمانی یک ساله در زمان‌های مشابه انتخاب شدند تا از منظر شکل ظاهری و ویژگی‌های پراکنشی سطح زمین یکسان باشند. همبستگی زمانی و مکانی زوج تصویر اصلی و فرعی جهت تولید یک تداخل‌نگاشت مناسب مهم است. مطابق شکل ۴، در اولین گام پردازش تخمین مقادیر پایه^{۱۰} صورت می‌گیرد و مقدار نرمال پایه^{۱۱} و مقدار نقطه مرکزی داپلر^{۱۲} زوج تصویر اصلی و فرعی به ترتیب جهت سنجش فاصله دو ماهواره از یکدیگر و تفاوت مرکزیت فرکانس دو

تصویر، محاسبه شده و با مقدار بحرانی نرمال پایه^{۱۳} و مقدار بحرانی نقطه مرکزی داپلر^{۱۴} مقایسه می‌شوند. این گام از پردازش این امکان را می‌دهد تا در مورد پارامترهای مداری و همبستگی زمانی و مکانی زوج تصاویر ورودی، اطلاعات کسب شود و میزان تناسب تصاویر با یکدیگر سنجیده شود. برای نمایش کیفیت تصاویر، رابطه ۱ و رابطه ۲ در این مقاله تعریف شده است که به ترتیب در رابطه ۱ مقدار BC از تقسیم مقدار نرمال پایه بر مقدار نرمال پایه بحرانی و در رابطه ۲ مقدار DC از تقسیم مقدار نقطه مرکزی داپلر بر مقدار نقطه مرکزی داپلر بحرانی به دست می‌آید. مقدار BC و DC بی‌بعد بوده و مقادیر آن برای دو ماهواره Envisat و Alos Palsar در یک مقیاس می‌باشند.

$$BC = \frac{\text{Normal Baseline}}{\text{Critical Normal Baseline}} \quad (1)$$

$$DC = \frac{\text{Doppler Centroid}}{\text{Critical Doppler Centroid}} \quad (2)$$

مقدار مناسب BC و DC برای محاسبه فرونشست، بین ۰ و ۱ است و هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد تناسب بیشتری بین زوج تصویر اصلی و فرعی وجود دارد. وقتی مقدار BC از ۱ بیشتر شود، یعنی مقدار نرمال پایه و مقدار نقطه مرکزی داپلر از مقدار بحرانی خود بزرگتر شده است و در این صورت استفاده از این زوج تصویر جهت محاسبه فرونشست پیشنهاد نمی‌گردند.

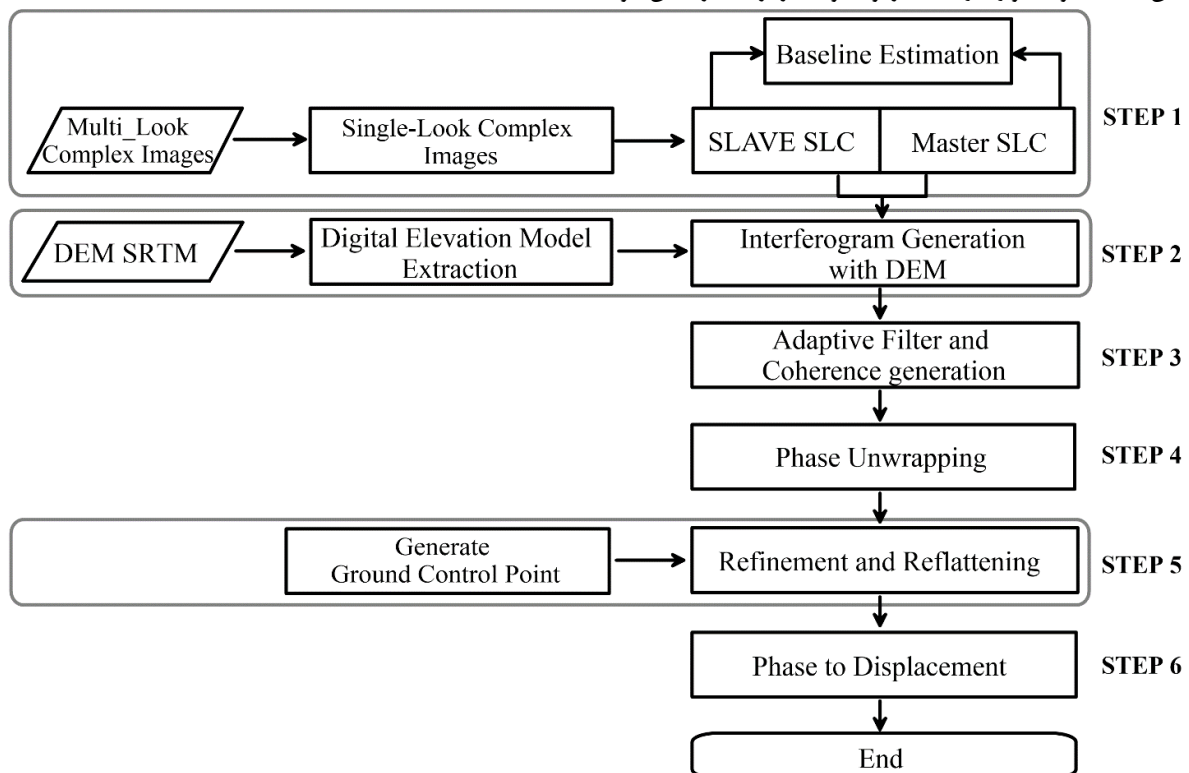


Fig. 4- Steps of radar satellite image processing to calculate land subsidence

شکل ۴- گام‌های پردازش تصاویر راداری برای محاسبه فرونشست

باشد، نشان‌دهنده همبستگی بیشتر می‌باشد. سپس در گام چهارم فازهای تولید شده با استفاده از یک الگوریتم در محدوده 2π و -2π قرار می‌گیرد و با در نظر گرفتن آستانه برای مقادیر همبستگی زمانی، کیفیت داده افزایش می‌یابد^{۱۹}. برای اطمینان از صحت مقادیر فاز، در مرحله پنجم اصلاح و مسطح‌سازی مجدد^{۲۰} فاز به گام‌های اجرا اضافه می‌گردد تا خطا و انحراف فاز اصلاح شده و اعوجاج^{۲۱} از تصاویر حذف شود. این اصلاحات بر مبنای نقاط کنترل زمینی^{۲۲} (GCP) صورت می‌گیرند. این نقاط از روی تصاویر فیلتر شده گام سوم با کمک DEM منطقه به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که فاقد جابه‌جایی بوده، از مرزها و توپوگرافی فاصله داشته و همبستگی زمانی بالایی داشته باشند.

در صورت عدم وجود اعوجاج در تصاویر، انتخاب ۱ تا ۱۲ نقطه برای GCP مناسب می‌باشد. در گام نهایی (گام ششم شکل ۴) مقادیر فاز به جابه‌جایی^{۲۳} تبدیل می‌شود. مقادیر منفی نقشه به دست آمده نشان‌دهنده فرونشست می‌باشد.

۵- نتایج

۵-۱- بررسی فرونشست استان قزوین بر اساس داده‌های راداری

با استفاده از تصاویر راداری نرخ زمانی فرونشست محاسبه و محدوده آن توسط نرم‌افزار GIS رسم شده است. شکل ۶ نمونه‌ای از نقشه‌های

تغییرات BC و DC زوج تصاویر ASAR Envisat و PALSAR ALOS در مقابل یکدیگر رسم شده است و در شکل ۵ نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۵ دیده می‌شود اکثر زوج تصاویر ASAR Envisat ALOS PALSAR از کیفیت عالی برخوردارند زیرا در ناحیه ۱ که مقدار BC و DC آنها نزدیک به صفر است، واقع شده‌اند. همچنین مابقی تصاویر نیز در ناحیه ۳ قرار دارند و از کیفیت خوبی برخوردارند، زیرا مقدار DC آنها نزدیک به صفر و مقدار BC آنها زیر ۱ می‌باشد. در نهایت زوج تصاویر انتخاب شده جهت اندازه‌گیری فرونشست مطابق جدول ۲ می‌باشند.

پس از تأیید کیفیت تصاویر، در گام دوم (شکل ۴) تداخل نگاشت با استفاده از دو داده ورودی مختلط منفردنگر (SLC^{۱۵}) تولید می‌شود. در این گام، توپوگرافی از تصویر تداخل نگاشت حذف می‌گردد تا تداخل نگاشت مسطح ایجاد گردد. جهت حذف توپوگرافی، از مدل ارتفاعی دیجیتال^{۱۶} (DEM) SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر استفاده شده است که از سایت USGS برای استان قزوین دریافت شده است. در گام سوم (شکل ۴) تداخل نگاشت مسطح، فیلتر^{۱۷} می‌شود و همبستگی زمانی^{۱۸} دو تصویر اصلی و فرعی محاسبه می‌گردد. همبستگی زمانی مقادیری بین ۱ تا ۰ دارد و هر چه به یک نزدیک‌تر

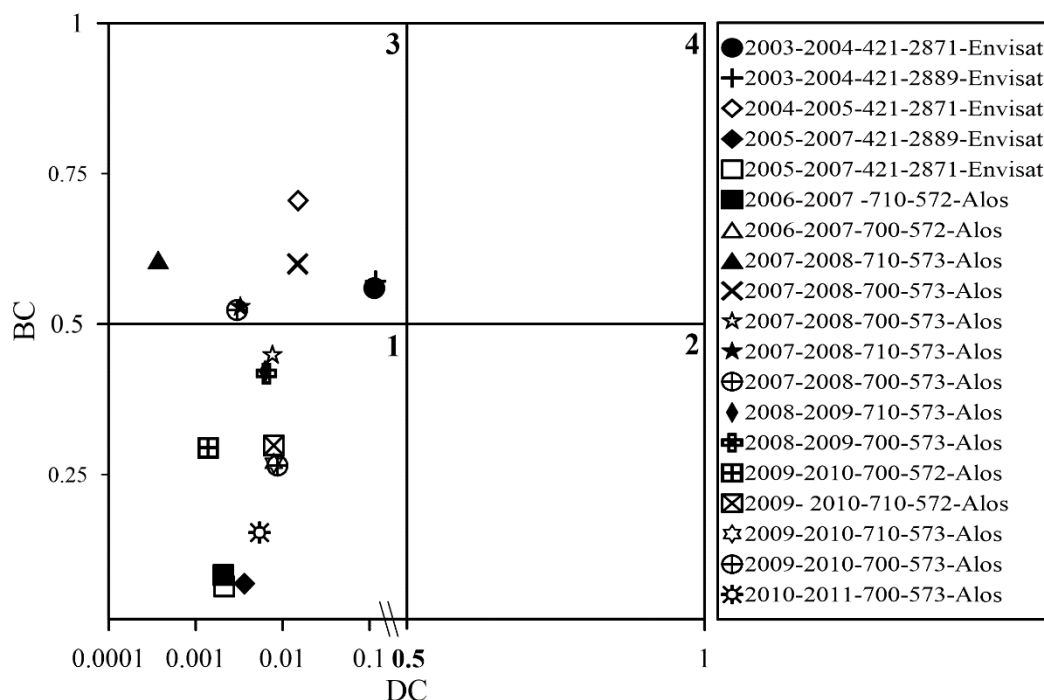


Fig. 5- Graph of BC vs DC values to show the quality of pairs of radar images
 شکل ۵- ترسیم مقادیر BC و DC در مقابل یکدیگر جهت نمایش کیفیت زوج تصاویر راداری

Table 2- Selected pairs of the radar images for measuring land subsidence

جدول ۲- زوج تصاویر انتخاب شده جهت برآورد فرونشست

No.	Satellite	Frame and Path	Acquired master data time	Acquired slave data time	No.	Satellite	Frame and Path	Acquired master data time	Acquired slave data time
1	Envisat	421,2871	12/14/2004	11/19/2003	19	Alos	573,700	1/8/2011	1/5/2010
2	Envisat	421,2889	12/14/2004	11/19/2003	20	Sentinel	108,471	12/31/2015	11/18/2014
3	Envisat	421,2871	11/23/2005	9/29/2004	21	Sentinel	108,471	1/5/2015	11/18/2014
4	Envisat	421,2889	11/28/2007	11/23/2005	22	Sentinel	108,471/472	12/31/2015	8/9/2015
5	Envisat	421,2871	11/28/2007	11/23/2005	23	Sentinel	108,471	8/9/2015	5/29/2015
6	Alos	572,710	2007/14/12	12/11/2006	24	Sentinel	108,471	5/29/2015	3/18/2015
7	Alos	572,700	2007/14/12	12/11/2006	25	Sentinel	108,471	3/18/2015	1/5/2015
8	Alos	573,710	12/16/2008	12/14/2007	26	Sentinel	108,472	12/25/2016	12/31/2015
9	Alos	573,700	12/16/2008	12/14/2007	27	Sentinel	108,472	3/12/2016	12/31/2015
10	Alos	573,700	10/2/2008	9/30/2007	28	Sentinel	108,472	6/16/2016	3/12/2016
11	Alos	573,710	8/17/2008	6/30/2007	29	Sentinel	108,472	12/25/2016	10/14/2016
12	Alos	573,700	8/17/2008	6/30/2007	30	Sentinel	108,472	10/14/2016	6/16/2016
13	Alos	573,710	8/20/2009	8/17/2008	31	Sentinel	108,472	12/20/2017	12/25/2016
14	Alos	573,700	8/20/2009	8/17/2008	32	Sentinel	108,472	3/19/2017	12/25/2016
15	Alos	572,700	8/7/2010	8/20/2009	33	Sentinel	108,472	12/20/2017	10/9/2017
16	Alos	572,710	8/7/2010	8/20/2009	34	Sentinel	108,472	10/9/2017	6/11/2017
17	Alos	573,710	8/7/2010	8/20/2009	35	Sentinel	108,472	6/11/2017	3/19/2017
18	Alos	573,700	8/7/2010	8/20/2009					

همچنین بیشترین مقدار فرونشست برای هر سال محاسبه شد که این داده مربوط به یک پیکسل و به صورت نقطه‌ای می‌باشد. بیشترین مقدار مشاهده شده فرونشست در استان قزوین ۵۸- سانتی‌متر در سال ۲۰۰۷-۲۰۰۸ بوده است. میانگین بیشترین فرونشست در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ مقدار ۲۲/۷- سانتی‌متر در سال خواهد بود (شکل ۸).

۵-۲- تأثیر تغییرات سطح ایستابی استان قزوین بر فرونشست

خصوصیات آبخوان قزوین بر اساس داده‌های زمین‌شناسی و آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. آبخوان قزوین بخشی از استان قزوین را شامل شده است که موقعیت جغرافیایی آن در شکل ۹ مشخص است. همچنین منحنی هم‌افت سطح ایستابی در محدوده آبخوان قزوین طی ۲۷ سال در شکل ۹ نمایش داده شده است تا شدت تخلیه آبخوان در سه دهه گذشته بررسی گردد. مقادیر افت آبخوان از کسر تراز سطح ایستابی سال ۱۳۷۰ از سال ۱۳۹۷ در ۹۰ چاه مشاهده‌ای به دست آمده است و در محیط GIS مقادیر افت درون‌یابی شده و منحنی‌های هم‌افت رسم شده‌اند.

فرونشست تولید شده در استان قزوین می‌باشد و فرونشست قابل توجهی در استان قزوین را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ پدیده فرونشست بیشتر در قسمت جنوب استان، شهرستان آبیک، تاکستان و بوبین زهرا مشاهده شده است. بیشترین نرخ فرونشست مربوط به سال ۲۰۰۸ بوده و در منطقه تاکستان رخ داده است. مطابق شکل ۳، گزارش‌های میدانی شواهدی از فرونشست در استان قزوین را در شمال بوئین زهرا و مرز تاکستان گزارش نمودند که با نقشه‌های جابه‌جایی به دست آمده از تصاویر راداری هماهنگ هستند.

تغییرات میانگین فرونشست در سطح استان قزوین و بیشترین مقدار فرونشست در سطح استان به صورت سالانه در شکل ۷ و شکل ۸ رسم شده است. با بررسی زمانی این شکل دیده می‌شود از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ فرونشست سالانه افزایش یافته و در سال ۲۰۰۸ به بیشینه خود رسیده است و دوباره کاهش یافته است. بیشترین مقدار میانگین فرونشست در سطح کل استان قزوین ۸- سانتی‌متر در سال بوده که در سال ۲۰۰۸-۲۰۰۷ رخ داده است. سپس از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ شیب تغییرات فرونشست کاهش یافته است. به طور کلی به صورت میانگین در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ استان قزوین ۳/۳- سانتی‌متر فرونشست داشته است (شکل ۷).

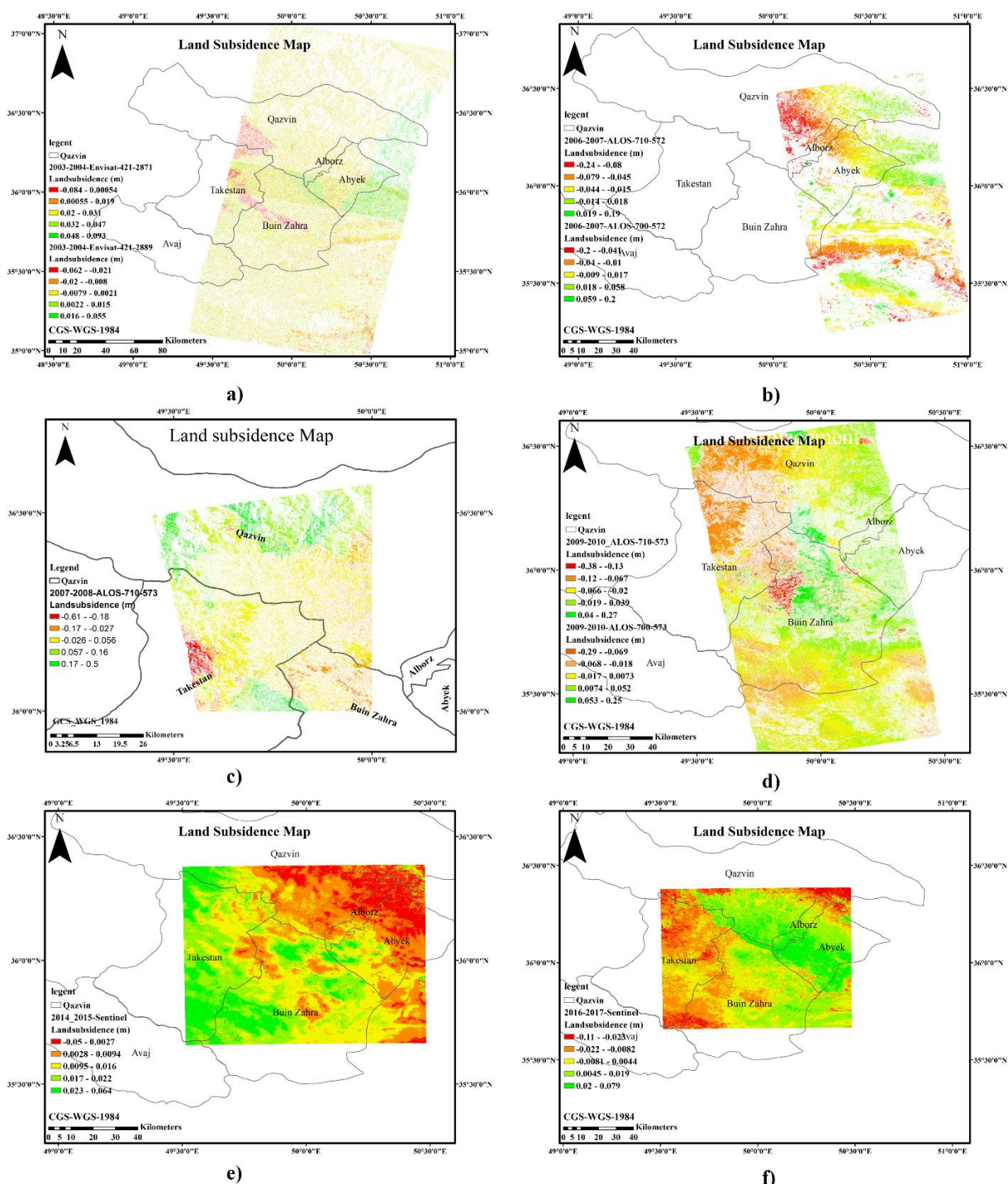


Fig. 6- Some of the land subsidence maps for Qazvin province for the periods of a) 2003-2004, b) 2006-2007, c) 2007-2008, d) 2009-2010, e) 2014-2015 and f) 2016-2017.

شکل ۶- تعدادی از نقشه‌های فرونشست استان قزوین برای سال‌های، (a، ۲۰۰۶-۲۰۰۷ (b، ۲۰۰۷-۲۰۰۸ (c، ۲۰۰۸-۲۰۰۹ (d، ۲۰۱۴-۲۰۱۵ (e، ۲۰۱۵-۲۰۱۶ (f و ۲۰۱۶-۲۰۱۷.

در این سال‌ها بیشترین افت سطح ایستابی در آبخوان قزوین حدود ۵۸ سانتی‌متر بوده است که در شمال بویین زهرا و مرز تاکستان رخ داده است (شکل -C). با توجه به شکل ۹ بیشترین افت‌ها در شمال بویین زهرا و مرز تاکستان رخ داده است که با بررسی نقشه‌های فرونشست (شکل ۶) دیده شد مناطقی که در استان قزوین دچار فرونشست‌های زیاد هستند در محدوده‌ای آبخوان قرار گرفته‌اند و مقادیر بیشینه فرونشست با محدوده افت شدید سطح ایستابی هماهنگی دارند. شکل ۱۰ به عنوان نمونه تصاویر فرونشست در آبخوان قزوین را نمایش می‌دهد.

تغییرات میانگین تراز سطح ایستابی آبخوان قزوین در شکل ۱۱ ترسیم شده است. این شکل از میانگین‌گیری سالانه تغییرات تراز سطح ایستابی ۱۸۲ چاه مشاهده‌ای استان قزوین بین سال‌های ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۷ به دست آمده است. با توجه به شکل ۱۱، میانگین افت سطح ایستابی در آبخوان قزوین بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷، ۲۰- متر می‌باشد که با میانگین فرونشست بیشینه ۲۲/۷- متر در همین دوره می‌توان گفت به ازای هر ۱۰ متر افت سطح ایستابی در این سال‌ها ۱/۱ متر فرونشست حادث شده است.

همچنین با توجه به شکل ۱۱، میانگین افت آبخوان از سال ۱۳۴۵ تا سال ۱۳۹۷ حدود ۴۵ متری بوده است. روند کلی تراز سطح ایستابی نزولی بوده است و در سال‌های ۶۰ تا ۷۰ شیب نزول سطح ایستابی کاهش یافته و در سال‌های ۷۰ تا ۸۰ افزایش تراز سطح ایستابی دیده شده است.

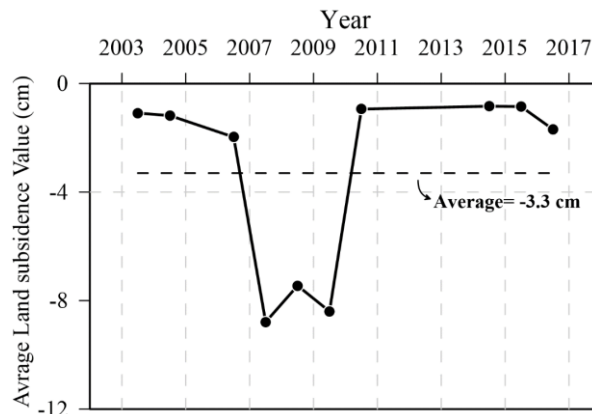


Fig. 7- Annual average of land subsidence in Qazvin province for the period of 2003-2017

شکل ۷- میانگین سالانه میزان فرونشست در سطح استان قزوین در سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷

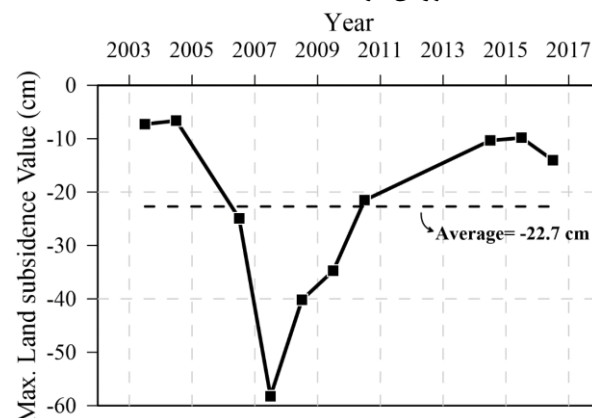


Fig. 8- Maximum values of land subsidence in Qazvin province in each year

شکل ۸- بیشترین میزان فرونشست در سطح استان قزوین در سال

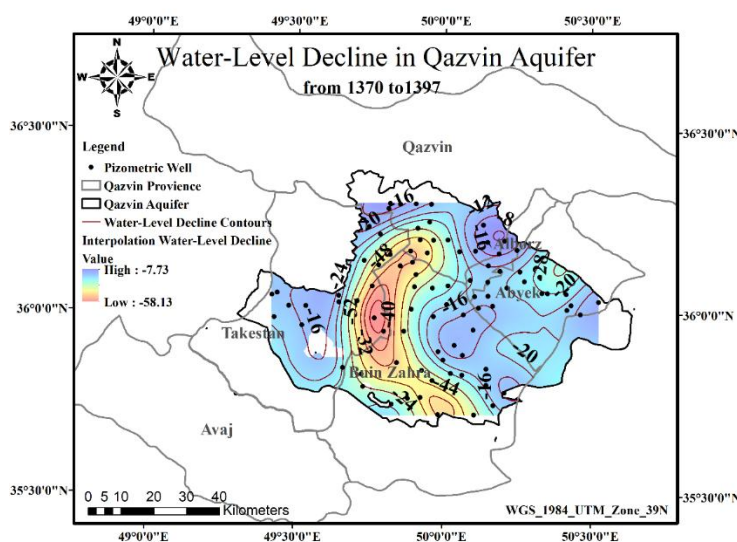


Fig. 9- Water-level decline in the Qazvin aquifer in the period of 1370-1397

شکل ۹- منحنی هم افت تراز سطح ایستابی در محدوده آبخوان قزوین بین سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۷

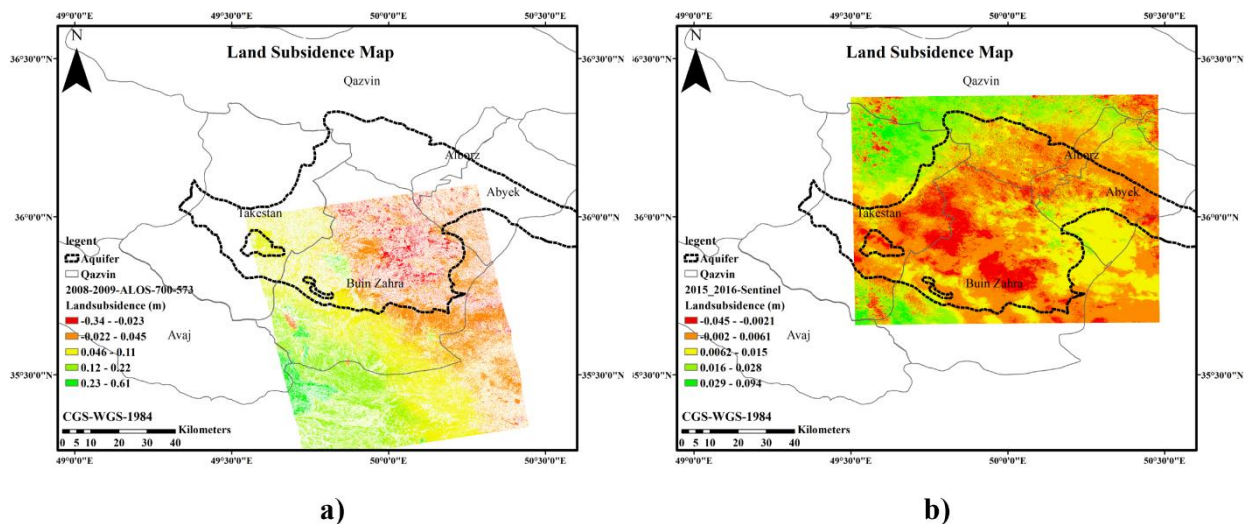


Fig. 10- Land subsidence map in Qazvin aquifer for the period of a) 2008-2009 and b) 2015-2016

شکل ۱۰- نقشه فرونشست در آبخوان قزوین (a) ۲۰۰۸-۲۰۰۹ و (b) ۲۰۱۵-۲۰۱۶

نمایش داده شده است. در این دو شکل میزان فرونشست در محیط آبخوان در کنار میزان فرونشست کل استان قزوین قرار گرفته است. در شکل ۱۲ دیده می‌شود از ۱۰ سال مورد بررسی، در ۶ سال میانگین فرونشست در منطقه آبخوان قزوین بیشتر بوده است و در یک سال نیز تقریباً برابر بوده‌اند، که این نشان از بیشتر بودن مقادیر فرونشست در منطقه آبخوان قزوین را دارد. همچنین شکل ۱۳ نشان می‌دهد از ۱۰ سال مورد بررسی، ۸ سال بیشترین فرونشست‌ها در محدوده آبخوان اتفاق افتاده است. بر این اساس در ۸۰٪ موارد بیشترین فرونشست در محیط آبخوان بوده است و ۲۰٪ باقی‌مانده میزان بیشینه فرونشست در آبخوان حداقل ۶۵ درصد میزان فرونشست کل استان قزوین بوده است. محدوده آبخوان مرز چاه‌های قابل برداشت استان قزوین در نظر گرفته شده است. در سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹ و ۲۰۰۷-۲۰۰۸ بیشترین فرونشست در خارج آبخوان بوده است و در شهرستان تاکستان در مرز آبخوان و محدوده اثرات آن رخ داده است. میانگین فرونشست در سطح آبخوان قزوین ۳۹/۹- میلی‌متر در سال به دست آمد که بیشتر از میانگین فرونشست در سطح استان قزوین (۳۳- میلی‌متر در سال) بوده است. این مقادیر با نتایج Babae et al (2020) که میانگین فرونشست در دشت قزوین را ۴۰- میلی‌متر در سال بیان نمودند همخوانی دارد.

علاوه بر شدت افت سطح ایستابی، ضخامت لایه‌های ریزدانه نیز بر میزان فرونشست تأثیرگذار می‌باشند (Akbari et al., 2019; Hajeb et al., 2019). بر اساس سونداژهای ژئوالکتریک جنس لایه‌بندی خاک در ۸ چاه به دست آمده است که شکل ۱۴ موقعیت جغرافیایی چاه‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۹ دیده می‌شود تراز سطح ایستابی در استان قزوین در دهه ۷۰ روندی افزایشی داشته است و این بایستی سبب کاهش شیب فرونشست گردد. تغییرات فرونشست در شکل ۷ نشان می‌دهد در سال ۲۰۰۸ که معادل سال ۱۳۸۷ است، شیب فرونشست کاهش یافته است. علت این کاهش را می‌توان به تغییرات سطح ایستابی نسبت داد و از آنجا که معمولاً تغییرات فشار آب منفذی و تأثیر بر تنش مؤثر زمان‌بر است و این زمان تأخیر بر طبق نظر برخی از پژوهشگران از چند ماه تا چند سال متغیر است (Angorani et al., 2016)، این اختلاف زمانی را می‌تواند بر اساس زمان تأخیر دانست.

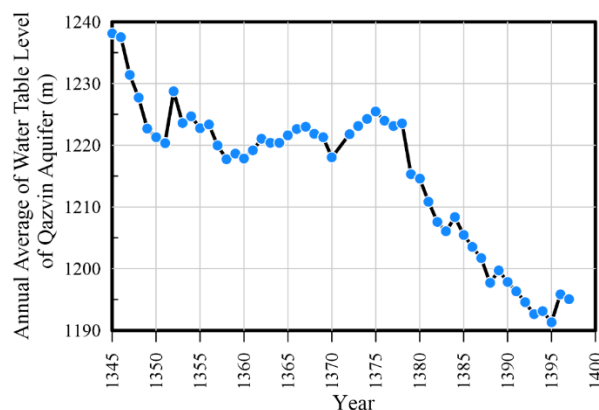


Fig. 11- The groundwater table variations of Qazvin aquifer for the period of 1966-2018

شکل ۱۱- تغییرات سطح ایستابی آبخوان قزوین از سال ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۷

اثر تغییرات سطح ایستابی بر میزان بیشترین فرونشست سالانه و متوسط فرونشست سالانه در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ به صورت عددی

همگی بر نتایج میدانی فرونشست در جنوب استان قزوین قسمت بویین زهرا و تاکستان صحه می گذارند (شکل ۳).

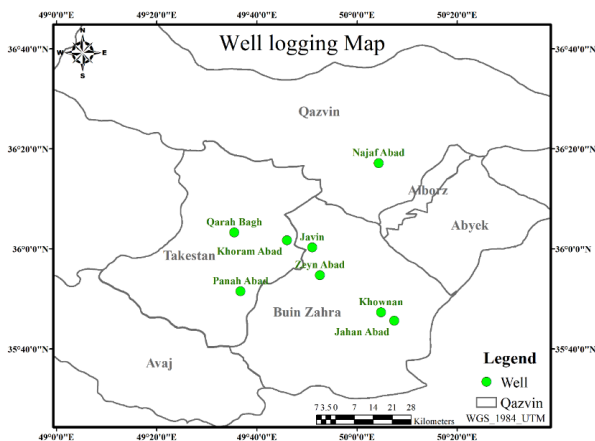


Fig. 14- Geographical location of Well logging
 شکل ۱۴- موقعیت جغرافیایی چاه‌های اندازه‌گیری لایه‌بندی خاک

۶- نتیجه‌گیری

استان قزوین یک قطب کشاورزی است و تعداد چاه‌ها و برداشت از آبخوان در آن بسیار افزایش یافته، به طوری که در ۵۰ سال اخیر سطح ایستابی آبخوان قزوین، اقی حدود ۴۵ متر داشته است. هدف از این مقاله محاسبه فرونشست دشت قزوین و سنخس تغییرات سطح ایستابی و لایه‌بندی خاک بر این پدیده بوده است. در این پژوهش با استفاده از پردازش تصاویر راداری سنجده‌های Envisat، ALOS SENTINEL-1a و PALSAR1 فرونشست استان قزوین از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ بررسی گردید و نتایج نشان دادند، بیشترین فرونشست‌ها در مناطق تاکستان، شمال بویین زهرا و بخشی از آبیگ هستند که این مناطق در محدوده آبخوان استان قزوین با افت شدید سطح ایستابی واقع شده‌اند. استان قزوین در طی سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۰۳ به صورت میانگین در سال ۳/۳- سانتی‌متر در سال فرونشست داشته است که این مقدار برای محدوده آبخوان قزوین ۳/۹- سانتی‌متر در سال بدست آمده است. همچنین بیشترین فرونشست در محدوده آبخوان اتفاق افتاده است. میانگین بیشترین فرونشست طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ استان قزوین ۲۲/۷- در سال بوده است. با در نظر گرفتن ۲۰- متر میانگین افت سطح ایستابی در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ می‌توان گفت در سال‌های تحت بررسی به ازای هر ۱۰ متر افت سطح ایستابی، ۱/۱ سانتی‌متر فرونشست حادث شده است. با بررسی تغییرات لایه‌بندی خاک و تغییرات فرونشست قزوین دیده شد مناطق دارای فرونشست در محیط آبخوان و جایی که ضخامت ریزدانه بیشتر بوده است رخ داده‌اند.

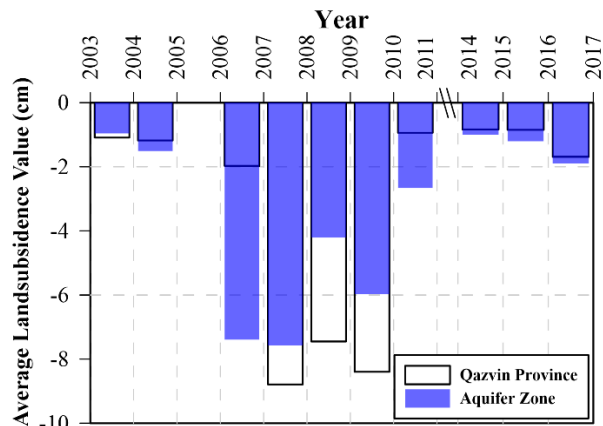


Fig. 12- Comparison of annual average values of land subsidence in Qazvin aquifer zone and province

شکل ۱۲- مقایسه میانگین سالانه فرونشست در محیط آبخوان و سطح استان قزوین

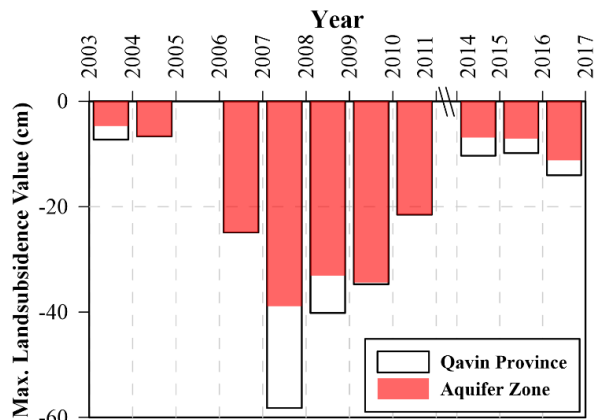


Fig. 13- Comparison of maximum values of land subsidence in Qazvin aquifer zone and province

شکل ۱۳- مقایسه بیشترین فرونشست در محیط آبخوان و استان قزوین

برای ارزیابی فرونشست جنس لایه‌بندی خاک در عمقی از لایه آبخوان که آب خود را از دست داده حایز اهمیت است، از این رو جنس لایه‌های خاک در حد فاصل عمق سطح ایستابی سال ۱۳۷۰ تا عمق سطح ایستابی سال ۱۳۹۷ (میزان افت ۲۷ ساله) در شکل ۱۵ ترسیم شده است. با توجه به شکل ۱۵ دیده می‌شود در شهرستان قزوین جنس لایه‌های خاک درشت دانه و شن می‌باشد و با وارد شده به قسمت‌های جنوبی استان مانند شهرستان تاکستان و شهرستان بویین زهرا جنس لایه‌های خاک ریزدانه شده به طوری که لایه‌های خاک در چاه روستای خونان و جهان‌آباد بیشتر رس و سیلت می‌باشد. از آنجا که بیشترین فرونشست‌ها در بویین زهرا و تاکستان رخ داده است، می‌توان آن را از وجود ضخامت لایه‌های ریزدانه نیز دانست. نتایج عددی، نقشه‌های فرونشست، افت سطح ایستابی و ضخامت لایه‌های ریزدانه

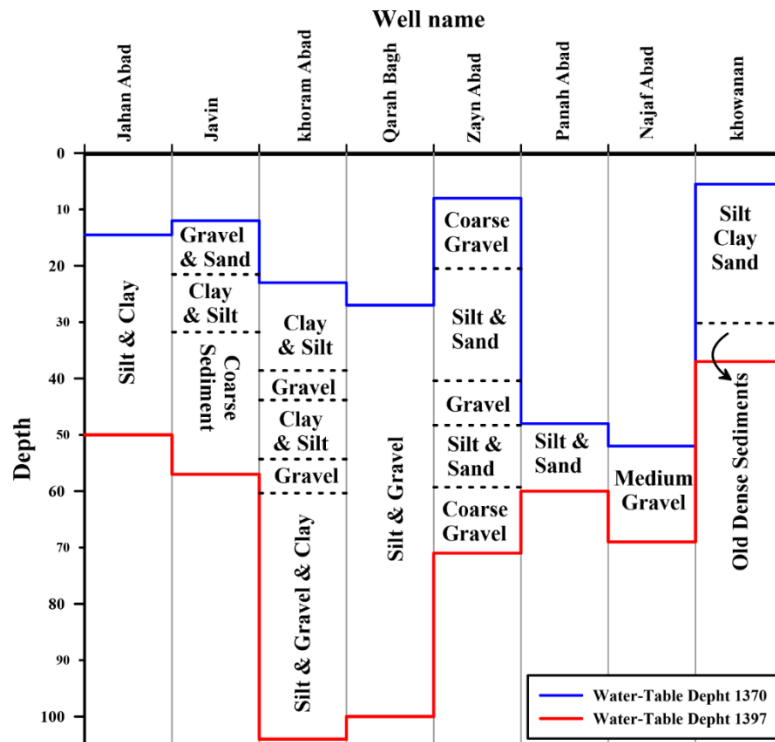


Fig. 15- Well logging in Water-level decline depth in the period of 1991-2018
 شکل ۱۵- لایه بندی خاک در محدوده عمق افت آبخوان بین سالهای ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۷

۷- مراجع

Akbari Arimi H, Momeni A, Khorasani E (2019) Assessment of land subsidence of the Semnan plain due to groundwater extraction. *New Findings in Applied Geology* 13(26):98-110

Alipour S, Motgah M, Sharifi M A, Walter T R (2008) InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran. *Second Workshop on Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas* (1)1-5, <https://doi.org/10.1109/USEREST.2008.4740370>

Amighpey M, Arabi S, Talebi A (2010) Studying Yazd subsidence using InSAR and precise leveling. *Geosciences Journal* 20(77):157-164 (In Persian)

Angorani S, Shaiat Panahi M, Memaian H, Bolourchi M J (2015) Dynamic modeling of Land Subsidence in Tehran Plain. *Geosciences* 25(97):211-220 (In Persian)

Ashrafiyanfar N, Busch W, Dehghani M, Haghghatmehr P (2010) Differential SAR interferometric technique for land subsidence monitoring due to ground water exploitation in the Hasthgerd. *Proc. 'Fringe 2009 Workshop'*, Frascati, Italy, 30 November- 4 December 2009, ESA SP-677, March 2010

در نهایت در این پژوهش توانایی تصاویر راداری در برآورد فرونشست نشان داده شد و وقوع فرونشست با محدوده افت شدید سطح ایستابی و ضخامت لایه ریزدانه هماهنگی داشته است.

پی نوشتها

- 1- Remote Sensing
- 2- Synthetic-Aperture Radar
- 3- Interferometric Synthetic-Aperture Radar
- 4- Differential SAR Interferometry
- 5- Master
- 6- Slave
- 7- Small Baseline Subset
- 8- GAMMA
- 9- Lag Time
- 10- Baseline Estimation
- 11- Normal Baseline
- 12- Doppler Centroid
- 13- Critical Normal Baseline
- 14- Critical Doppler Centroid
- 15- Single Look Complex
- 16- Digital Elavation Model
- 17- Adaptive Filter
- 18- Coherence
- 19- Phase Unwrapping
- 20- Refinement and Re-Flattening
- 21- Ground Control Point
- 22- Phase to Displacement

- Hooper A J (2007) Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation. *Journal of Geophysical Research* 112:1-21
- Hu B, Wang H S, Sun Y L, Hou J G, Liang J (2014) Long-term land subsidence monitoring of Beijing (China) using the Small Baseline Subset (SBAS) technique. *Remote Sensing* 6:3648-3661
- Koohbanani H, RYazdani M R, Hosseini S K (2019) Mapping land subsidence hazard through InSAR (Case study: Kashmar and Khalil Abad plain). *Desert Management* 13:65-76 (In Persian)
- Lashkaripour G R, Ghafoori M, Rostami Barani H R (2009) An investigation on the mechanism of earth-fissures and land subsidence in the western part of Kashmar Plain. *Geological Studies* 1(1):95-111 (In Persian)
- Manafi Azar A, Khamehchiyan M, Nadiri A (2019) Comparison of vulnerability of the southwest Tehran plain aquifer with simple weighting model (ALPRIFT Model) and Genetic Algorithm (GA). *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 4(2):199-212 (In Persian)
- Massonnet D, Feigl K (1998) Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics* 36(4):441-500
- Mirhashemi S H, Haghghat jou P, Mirzaei F, Panahi M (2018) The mining association rules for water table fluctuations analysis of Ghazvin city by Apriori algorithm. *Irrigation and Water Engineering* 8(31):140-151 (In Persian)
- Maghsoudi Y, Amani R, Ahmadi A (2019) A study of land subsidence in west of Tehran using Sentinel-1 images and permanent scatterers interferometry. *Iran-Water Resources Research* 15(1):299-313 (In Persian)
- Mohammad Khan Sh, Ganjian H, Garoosi L, Zangeneh tabar Z (2020) Evaluation of the effect of the groundwater decline on land subsidence using Sentinel-1 radar images, C Study area: Qorveh plain. *Data Geographical of Quarterly Research- Scientific* 112(28):220-229 (In Persian)
- Naderi K, Nadiry A, Asgary Moghadam A, Kord M (2018) A new method for assessing and displaying areas at risk of subsidence. *EcoHydrology* 5(1):85-93.(In Persian)
- Rott H, Nagler T (2006) The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research* 37(4):710- 719
- Safari A, Jafari F, Tavakoly Sabor S M (2015) Land subsidence monitoring and its relationship with groundwater depletion: A case study Karaj- Babae S, Mousavi Z, Mousavi Z, Hojati Malekshah A, Roostaei M, Aflaki M (2020) Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran. *Journal International Journal of Remote Sensing* 41(12):4780-4798
- Calderhead A I, Martel R, Alasset P J, Rivera A, Garfias J (2010) Land subsidence induced by groundwater pumping, monitored by D-InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Canadian Journal of Remote Sensing* 36(1):9-23, <https://doi.org/10.5589/m10-024>
- Calderhead A I, Therrien R, Rivera A, Martel R, Garfias J (2011) Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advanced in Water Resources* 34:83- 97, <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.017>
- Chatterjee R S, Shailaja Thapa K B, Singh G, Varunakumar E, Raju V R (2015) Detecting, mapping and monitoring of land subsidence in Jharia Coalfield, Jharkhand, India by spaceborne differential interferometric SAR, GPS and precision levelling techniques. *Journal of Earth System Science* 124(6):1359-1376
- Dehghani M (2014) An enhanced algorithm based on radar interferometry for monitoring land subsidence caused by over-exploitation of groundwater. *Journal of Geospatial Information Technology* 2(2):62-73
- Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, Borghi A, Musazzi S, Novali F, Prati C, Rocca F (2007) Sub millimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *Geoscience and Remote Sensing IEEE Transactions* 45:1142-1153, <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4156314>
- Gong W (2014) Long-term monitoring of geodynamic surface deformation using SAR interferometry. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gsi.ir
- Guoqing Y, Jingqin M (2008) D-InSAR technique for land subsidence monitoring. *Earth Science Frontiers* 15(4):239-243
- Haghghatmehr P, Valadanxouj M J, Tajik R, Jabari S, Sahebi M R, Eslami R, Ganjian M, Dehghani M (2012) Time series analysis of Hasjtgerd subsidence using radar interferometry and global positioning system. *Geosciences Journal* 22(85):105-114 (In Persian)
- Hajeb Z, mousavi Z, masoumi Z, Rezaei A (2019) InSAR time series analysis of interseismic deformation of Eastern part of Iran. *Geosciences Journal* 29(114):251-258 (In Persian)

- Strozzi T, Wegmuller U, Tosi L, Bitelli G, Spreckels V (2001) Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 67(11):1261-1270
- GroundWater Report (2010) Studies the water resources balance in the salt lake catchment. Region of water Company of Tehran, Volume 3 (In Persian)
- Tony W, Martin G C, and Fred G B (2005) Sinkhole and subsidence. Springer and Praxis Publishing pp 383 .
- Usgs.com
- Shahriyar plain. *Geomorphology Journal* 5(2):82-93 (In Persian)
- Shemshaki A, Mohammadi Y, Bolorchi M J (2008) Identification of confined aquifer zone and its role on land subsidence formation in Hashtgerd plain. *Geoscience* 20(79): 137-142 (In Persian)
- Soodmand Afshar R, Ahmadi S (2020) Monitoring of land subsidence due to overexploitation of groundwater using PS-InSAR in the region in hamadan proviance, Iran. *Journal of Geospatial Information Technology* 8(1):79-99 (In Persian)