تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نوزدهم، شماره ۵، زمستان ۱۴۰۲
Volume 19, No. 5, Winter 2024 (IR-WRR)
۱۴۵-۱۵۶

مطالعه وضعیت فرونشست زمین در اثر استخراج بی‌رویه آبهای زیرزمینی در ایران با استفاده از نقشه جامع فرونشست کشور

معصومه آمیغ‌پی[۱*] و سیاوش عربی[۲]

چکیده

استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی مشکلی جهانی محسوب می‌شود که علاوه بر تهدیدی که برای منابع آبی کشورها ایجاد نموده است، در بسیاری از موارد موجب پایین رفتن سطح زمین یا پدیده فرونشست شده است. سرزمین ایران نیز با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک از یک سو و فشار بر منابع آب زیرزمینی به منظور توسعه کشاورزی از دیگر سو، در موارد متعددی دچار فرونشست زمین شده است. با توجه به تهدیدات و آثار مخرب فرونشست زمین بر منابع آب و خاک، لزوم مدیریت این پدیده و جلوگیری از گسترش آن امری کلیدی در توسعه پایدار کشور محسوب می‌شود. از آنجا که نخستین گام در مدیریت این پدیده، شناسایی مناطق درگیر و اولویت‌بندی آن‌ها است، در این تحقیق، برای اولین بار با تلفیق انواع مشاهدات ژئودتیک نقشه جامع فرونشست زمین در ایران تهیه شده و مناطق درگیر از حیث وسعت و نرخ جابجایی ارتفاعی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. از دیگر سو، اطلاعات چاه‌های پیزومتری وزارت نیرو مورد بررسی قرار گرفت و سری زمانی وضعیت سطح این چاه‌ها محاسبه شد و مناطق بحرانی کاهش سطح آب مورد شناسایی قرار گرفت. با توجه به پردازش‌های انجام شده ادر بازه زمانی سالهای ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹، ۲۵۴ پهنه فرونشست در۳۰ استان کشور شناسایی شده است. بالاترین نرخ فرونشست کشور در این بازه زمانی مربوط به استان کرمان با نرخی بیش از ۴۰ سانتی‌متر در سال بوده است. اکثر مناطق فرونشست در دشتهای ممنوعه و ممنوعه بحرانی از نظر وضعیت سطح آب زیرزمینی اتفاق افتاده است. از آنجایی که توسعه بی‌برنامه کشاورزی منجر به افت شدید سطح آب در آبخوانهای کشور و فرونشست زمین شده است، اتخاذ سیاستهای پایدار در زمینه خودکفایی تولید محصولات کشاورزی تنها راه نجات کشور از وضعیت بحرانی آب و فرونشست است. اتخاذ روشهای آبیاری با حداقل هدر رفت، اجرای سیاستهای الگوی کشت و ممانعت از کشت محصولات پر آب بر در مناطق بحرانی فرونشست و جلوگیری از هدررفت محصولات کشاورزی تنها راه توسعه پایدار و همه جانبه کشور است.

کلمات کلیدی: فرونشست زمین، استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی، تداخل‌سنجی راداری، ترازیابی دقیق، سیستم تعیین موقعیت جهانی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۶/۱۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۷

Studying Land Subsidence in Iran Caused by Groundwater Over Extraction by Preparing the Comprehensive Subsidence Map of the Country

M. Amighpey [1] and S. Arabi[2]*

Abstract

Over-extraction of groundwater is considered a global problem, which, in addition to the threats to countries' water resources, has in many cases caused the lowering of the earth's surface or land subsidence. Iran has suffered land subsidence in many cases due to the dry and semi-arid climate on the one hand and the pressure on underground water resources for agricultural development on the other hand. Regarding the destructive effects of land subsidence on water and soil resources, it is a sustainability key issue to manage the phenomenon and prevent its spread. Since the first step in the management of this phenomenon is to identify the affected areas, in this research, for the first time, a comprehensive map of Iran's subsidence has been prepared by combining various geodetic observations, and the affected areas have been examined and analyzed in terms of their extent and height displacement rate. On the other hand, the information on the piezometric wells of the Ministry of Energy was examined and the time series of the level of these wells was calculated and the critical areas of water level reduction were identified. According to the processes carried out between 2015 and 2019, 254 subsidence zones have been identified in 30 provinces of the country. The highest subsidence rate in the country in this period was related to Kerman province with a rate of more than 40 cm per year. Most of the subsidence areas have occurred in the prohibited and critical plains in terms of the condition of the underground water level. Since the unsustainable development of agriculture has led to a sharp drop in the water level in the country's aquifers and subsidence of the land, adopting sustainable policies in the field of self-sufficiency in the production of agricultural products is the only way to save the country from the critical situation of water and subsidence. Adoption of irrigation methods with minimal wastage, implementation of cultivation model policies preventing the cultivation of water-rich crops in critical areas of subsidence, and preventing the wastage of agricultural products are the only ways of sustainable and comprehensive development of the country.

Keywords: Land Subsidence, Groundwater Overextraction, InSAR, Precise Leveling, GPS.

Received: September 2, 2023
Accepted: December 28, 2023

۱- رییس اداره ترازیابی دقیق و تداخل‌سنجی راداری، اداره کل نقشه‌برداری زمینی و بنیادی، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران.
۲- معاون اداره کل نقشه‌برداری زمینی و بنیادی، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۳ امکانپذیر است.

1- Head of the Precise Leveling and InSAR Office, Land Surveying Department, National Cartographic Center of Iran, Tehran, Iran.
Email: amighpey@yahoo.com
2- Deputy Director, Land Surveying Department, National Cartographic Center of Iran, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author
Doi: 10.22034/IWRR.2023.186215

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

رشد جمعیت همراه با گسترش بی‌رویه بهره‌برداری از آب به ویژه در امور کشاورزی و صنعت، جامعه امروز را با اثرات نامطلوب زیادی از جنبه‌های کمی و کیفی منابع آب مواجه کرده است. از این‌رو مدیریت پایدار بهره‌برداری از منابع آب امری ضروری است. افزایش روز افزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی انباشته گشته‌اند، در مناطق مختلفی از سرزمین پهناور ایران، موجب فرونشست زمین شده است (Amighpey et al., 2023). مخاطرات پدیده فرونشست ابعاد گسترده‌ای دارد که از آن جمله می‌توان به تخریب سیستم‌های آبیاری و خاک‌های حاصلخیز کشاورزی، تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب زمین و کاهش بازدهی یا ایجاد تخریب در شریان‌های حیاتی و سازه‌های مهم، کاهش برگشت‌ناپذیر تمام یا بخشی از مخزن آب زیرزمینی در نتیجه از بین‌رفتن یا کاهش تخلخل مفید نهشته‌ها، کاهش میزان نفوذپذیری سطحی و پیرو آن گسترش پهنه‌های بیابانی و سیلابی اشاره کرد.

فرونشست زمین در اثر استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی، چالشی جهانی است، به عنوان نمونه در آمریکا مساحتی بیش از ۲۷۰۰۰ کیلومتر مربع در ۴۵ ایالت تحت تأثیر فرونشست است (Wu et al., 2008). بیش از ۸۰ درصد موارد فرونشست گزارش شده در اثر استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی است (Galloway and Sneed, 2013). در بسیاری از مناطق بیابانی جنوب آمریکا و مناطق مرطوب واقع بر سنگ‌های انحلال‌پذیر مانند سنگ آهک، سنگ گچ، و نمکی فرونشست اتفاق رایج در اثر مواجهه انسان با منابع آب و زمین است (Tzampoglou et al., 2023). با توجه قرارگیری ایران در مناطق با اقلیم خشک و نیمه خشک، نباید نقش عوامل انسانی در بهره‌وری نامناسب از عرصه‌های آبخیز را کم اهمیت تلقی کرد و در چنین شرایط حساس طبیعی، لازم است مدیریت منابع آبی سرزمین به نحو بسیار دقیق‌تری نسبت به سایر مناطق جهان که دارای این وضعیت نیستند به اجرا درآید.

با توجه به گستردگی دامنه مخاطرات فرونشست، شناسایی و کنترل این پدیده امری حیاتی در مدیریت پایدار آب و خاک سرزمین محسوب می‌شود. به منظور تشخیص و کنترل جابجایی سطحی زمین ناشی از زلزله و فرونشست و زمین لغزش و غیره از تکنیک‌هایی همچون تداخل‌سنجی راداری، GPS و ترازیابی دقیق استفاده می‌شود. تلفیق مشاهدات تداخل‌سنجی راداری با پوشش وسیع و توان تفکیک مکانی بالا در کنار GPS با قدرت تفکیک زمانی بالا و نیز ترازیابی دقیق با دقت بالا می‌تواند منبع مناسبی برای اندازه گیری میدان جابجایی سطح زمین باشد (Ghayournajarkar and Fukushima, 2022; Polan and Zebker, 2022; Bagheri et al., 2017). میدان جابجایی به دست آمده از مشاهدات ژئودتیک در بررسی عوامل موثر بر فرونشست و مدل‌سازی این پدیده استفاده شده است (Manafiazar et al., 2023).

تاکنون موارد متعددی از اندازه‌گیری نرخ و پهنه فرونشست با استفاده از مشاهدات مختلف ژئودتیکی در مناطق مختلفی از سرزمین ایران گزارش شده است (Amighpey et al., 2008; Motagh et al., 2008; Dehghani et al., 2009; Ghafoori et al. 2012; Amighpey et al., 2016). در این مطالعات با استفاده از ترازیابی دقیق و تداخل‌سنجی راداری و GPS میزان فرونشست برخی مناطق محاسبه شده است. به جهت تعدد بالای مناطق فرونشست ایران و لزوم توجه فوری به وضعیت مناطق فرونشست، در این تحقیق برای نخستین بار نقشه فرونشست سراسر ایران با تلفیق انواع مشاهدات ژئودتیک محاسبه شده است. همچنین، پس از دستیابی به بانک جامع فرونشست کشور، مناطق بحرانی درگیر این پدیده با رویکرد استانی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۲- پایش میدان جابجایی سطحی زمین

ژئودزی، علم تعیین شکل و ابعاد زمین و میدان ثقل آن و بررسی تغییرات زمانی آن است. بررسی تغییرات سطح زمین، می‌تواند به عنوان پیش‌نشانگر حوادث مهیبی چون زلزله و آتشفشان و به‌منظور بررسی و کنترل رفتار گسل‌های فعال و همچنین مدل‌سازی گسل‌های مسبب زلزله و یا برای شناخت و کنترل فرونشست، نقش مهمی را در جلوگیری از بروز بحران و مدیریت سوانح طبیعی داشته باشد. بدین منظور در دهه‌های اخیر، تلاش گسترده‌ای به منظور اندازه‌گیری تغییرات پوسته زمین توسط تکنیک‌هایی مانند تداخل‌سنجی راداری، ترازیابی دقیق و GPS انجام شده است.

اولین اندازه‌گیری کمی و آشکارسازی عددی فرونشست در ایران، با تکرار مشاهدات شبکه ترازیابی درجه یک ایران و محاسبه تغییر ارتفاعی ایستگاه‌های ترازیابی انجام شده است (Amighpey et al., 2008). در این تحقیق، فرونشست ۴۴ پهنه از استان‌های مختلف کشور محاسبه و شناسایی شده که اولین گزارش و اندازه‌گیری کمی فرونشست در ایران محسوب می‌شود.

از دیگر مشاهدات ژئودتیک بررسی جابجایی سطحی زمین در کشور، مشاهدات GPS ایستگاههای دایمی ژئودینامیک است که فرونشست

را در مکان ایستگاه‌های مناطقی همچون توس، نیشابور، کاشمر، کرمان و یزد آشکارسازی و اندازه‌گیری نموده است. از دیگرسو، امروزه تکنیک تداخل‌سنجی راداری به عنوان یک تکنیک متداول برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین مطرح شده است. پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این تکنیک را به عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون زلزله، فرونشست، زمین لغزش و غیره مطرح کرده است. با پرتاب ماهواره sentinel-1 در سال ۲۰۱۴ توسط اتحادیه فضایی اروپا، مجموعه تصاویر راداری از باند C با طول موج ۵/۶ سانتی‌متر در دسترس عموم قرار گرفته است. این تصاویر از سه نوار کنار هم که هر نوار دارای ۹ قطعه است، تشکیل شده است. این تصاویر محدوده ۱۵۰ کیلومتر در راستای مسیر پرواز ماهواره و ۲۵۰ کیلومتر در راستای عمود بر پرواز را با قدرت تفکیک مکانی حدود ۱۴ متر پوشش می‌دهد. ویژگی بارز تصاویر این ماهواره در مقایسه با ماهواره‌های راداری پیشین اتحادیه فضایی اروپا پوشش وسیع‌تر منطقه تصویربرداری و قدرت تفکیک زمانی مناسب‌تر تصاویر اخذ شده از منطقه است که هر ۱۲ روز است. تصویربرداری این ماهواره، با استفاده از تکنولوژی مشاهده زمین با اسکن‌های پیشرفته انجام می‌شود. از آنجایی که تکنولوژی مشاهده زمین با اسکن‌های پیشرفته سرعت بالای داپلر در راستای آزیموت را تولید می‌کند، برای جلوگیری از ایجاد پرش و ناپیوستگی در اختلاف فاز تصاویر در بین قطعات هر نوار، ثبت هندسی بسیار دقیق تصاویر در حد یک هزارم پیکسل در راستای آزیموت مورد نیاز است.

در این تحقیق با محاسبه میدان جابجایی سطحی زمین در ایران با استفاده از پردازش تصاویر راداری ماهواره sentinel-1 با نرم‌افزار GMTSAR با دقت ثبت هندسی بالاو صحت‌سنجی نتایج آن با مشاهدات ترازیابی دقیق و مشاهدات GPS ایستگاه‌های دایمی ژئودینامیک، مناطق تحت تأثیر پدیده فرونشست در کشور مورد شناسایی و ارزیابی قرار گرفته است.

۳- نقشه جامع فرونشست ایران

به منظور برآورد نرخ فرونشست سالیانه در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی، از آنجایی که فشار بر منابع آب زیرزمینی در فصل‌های بهار و تابستان به مراتب بیش‌تر از مقادیری خواهد بود که برای فصل‌های پاییز و زمستان تعیین می‌شود؛ بنابراین برای تعیین دقیق این مقدار، درنظر گرفتن بازه‌ای حدود یک تا دو ساله مناسب به‌نظر می‌رسد. به منظور دستیابی به نقشه جامع فرونشست ایران، تصاویر راداری ماهواره sentinel-1 و اطلاعات مداری تصاویر برای کل ایران در بازه زمانی سالهای ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ و ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ از سایت مرکز فضایی اروپا اخذ شد (شکل ۱). حدود ۳۲ تصویر برای هر منطقه و در مجموع ۴۳۷۳ تصویر برای کل ایران در بازه زمانی دوساله در فاصله زمانی ۲۴ روز برداشت شد. همچنین، مدل رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر برای کل ایران دانلود شد. به منظور شناسایی مناطق فرونشست، با به کارگیری تکنیک خطوط مبنای کوتاه، تصاویر با استفاده از نرم‌افزار GMTSAR مورد پردازش قرار گرفت و نقشه میانگین میدان جابجایی سطحی زمین در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹، به همراه سری زمانی میدان جابجایی سطحی زمین در این بازه زمانی به دست آمد. از دیگر سو، اطلاعات چاه‌های پیزومتری وزارت نیرو مورد بررسی قرار گرفت و سری زمانی وضعیت سطح این چاه‌ها محاسبه شد و مناطق بحرانی کاهش سطح آب مورد شناسایی قرار گرفت. از دیگر منابع تحقیقاتی این تحقیق، گزارش تغییر ارتفاعی مسیرهای ترازیابی دقیق درجه یک کشور بود که قبلاً ۴۴ منطقه با فرونشست کاسه‌ای شکل را در مناطق کشاورزی نشان داده بود. همچنین، از سری زمانی ایستگاه‌های ژئودینامیک با مشاهدات دایمی GPS که نشان‌دهنده رفتار و نرخ تغییرات سطح زمین بود، استفاده شد. با بررسی تصاویر اپتیکی مناطق و حذف مناطق فرسایش خاکی، مناطق فرونشست مورد شناسایی قرار گرفت و نقشه جابجایی قائم در این مناطق با استفاده از میدان جابجایی سطحی به دست آمده از تداخل‌سنجی راداری به دست آمد. این نتایج با مشاهدات ترازیابی دقیق و GPS کالیبره و صحت‌سنجی شد. شکل ۱ مجموعه مشاهدات ژئودتیک و شبکه‌های مبنایی سازمان نقشه‌بردار کشور، استفاده شده در این مطالعه، که شامل تصاویر راداری دانلود شده به همراه پراکندگی ایستگاههای ژئودینامیک و ایستگاههای ترازیابی دقیق درجه یک است را نشان می‌دهد.

با توجه به پردازش‌های انجام شده از سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹، ۲۵۴ پهنه فرونشست در۳۰ استان کشور شناسایی شده است. به عنوان نمونه، شکل ۲- الف نمونه‌ای از نقشه‌های فرونشست تولید شده را نمایش می‌دهد. این نقشه مربوط به فرونشست منطقه بهرمان می باشد. شکل ۲- ب سری زمانی ایستگاه ژئودینامیک دایمی مشاهدات GPS واقع در منطقه را نشان می‌دهد که نتایج پردازشهای تداخل‌سنجی راداری با سرعت این ایستگاه صحت‌سنجی شده است. شکل ۲- ج نیز هیدروگراف واحد دشت رفسنجان و روند افت سطح آب آبخوان منطقه را نشان می‌دهد. شکل ۳ نقشه توزیع فرونشست زمین در ایران را نمایش می‌دهد. همانطور که از این نقشه پیداست، متأسفانه همه استانهای کشور به غیر از استان گیلان دچار فرونشست زمین شده‌اند کـــه بالاترین نرخ فرونشســت کشور در بازه زمانی سالهای ۱۳۹۵ تا

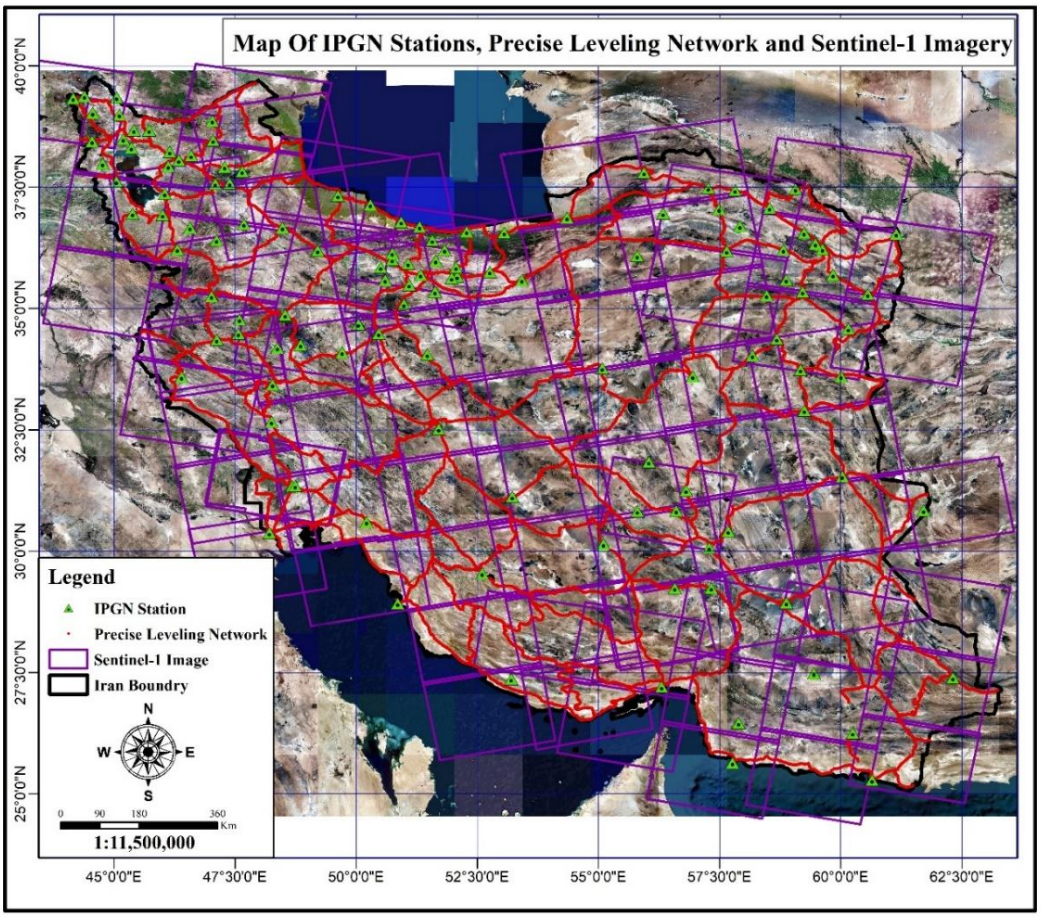
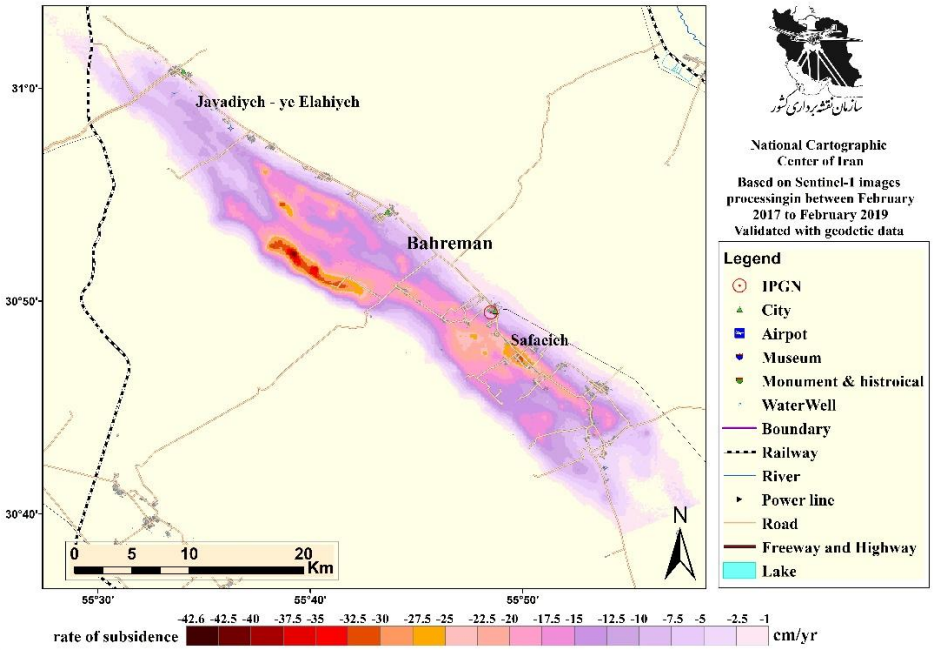


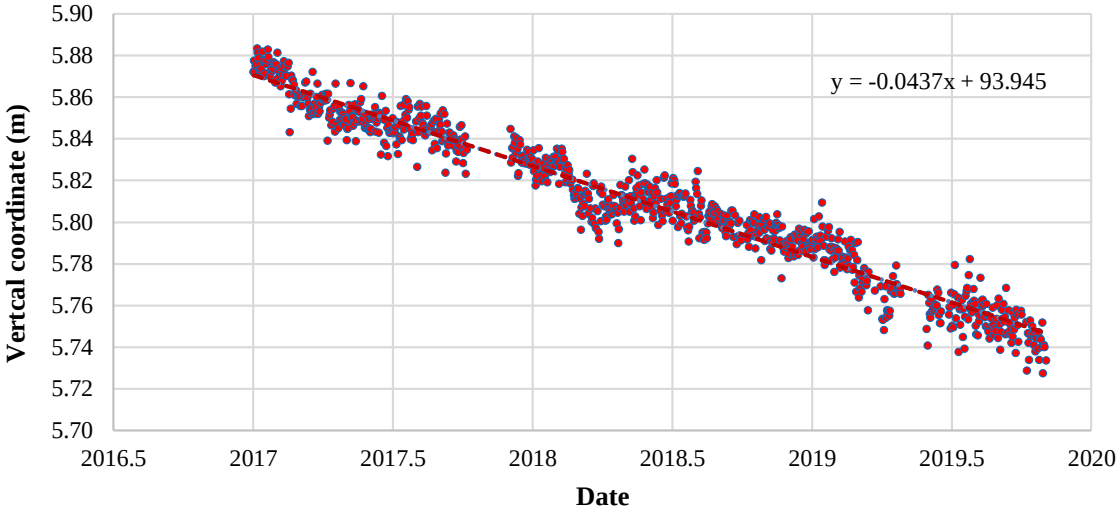
Fig. 1- Applied geodetic observations for computing comprehensive subsidence map of Iran

شکل ۱- مشاهدات ژئودتیک استفاده شده برای محاسبه نقشه جامع فرونشست ایران

(a)



(b)



(c)

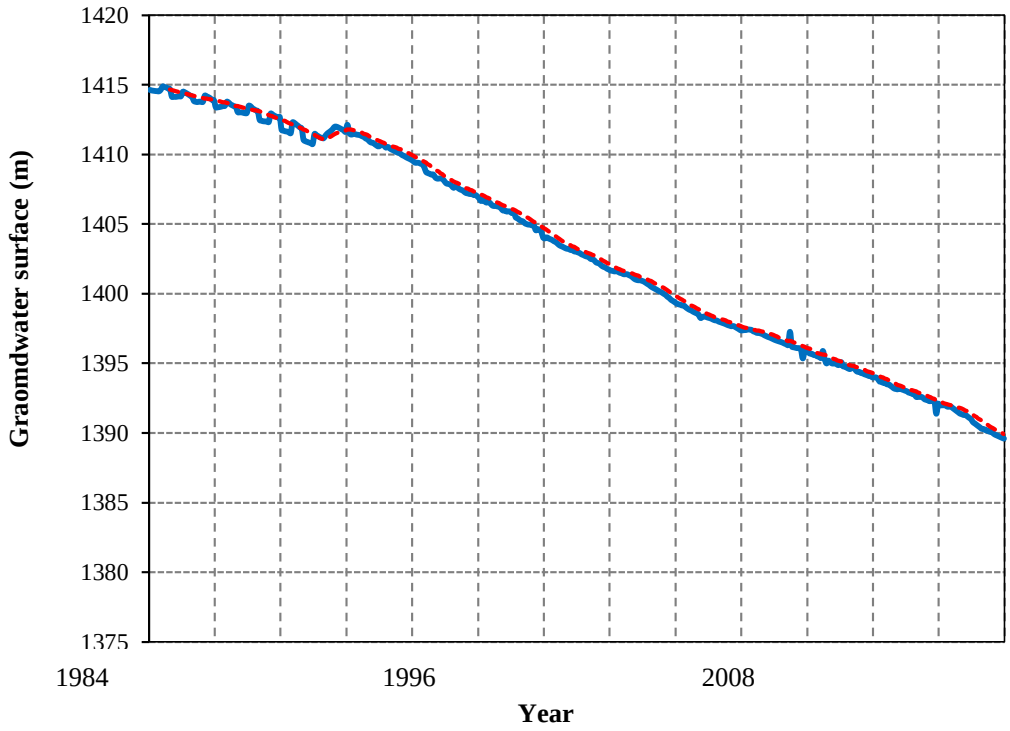


Fig. 2- (A) Bahreman subsidence map (B) IPGN time series of Ferdosiye Nogh in Bahreman subsidence area (C) ground water surface of Rafsanjan aquifer

شکل ۲- الف- نقشه فرونشست کرمان- زرند، ب- سری زمانی ایستگاه دایمی GPS فردوسیه نوق واقع در پهنه فرونشست بهرمان، ج- هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی رفسنجان

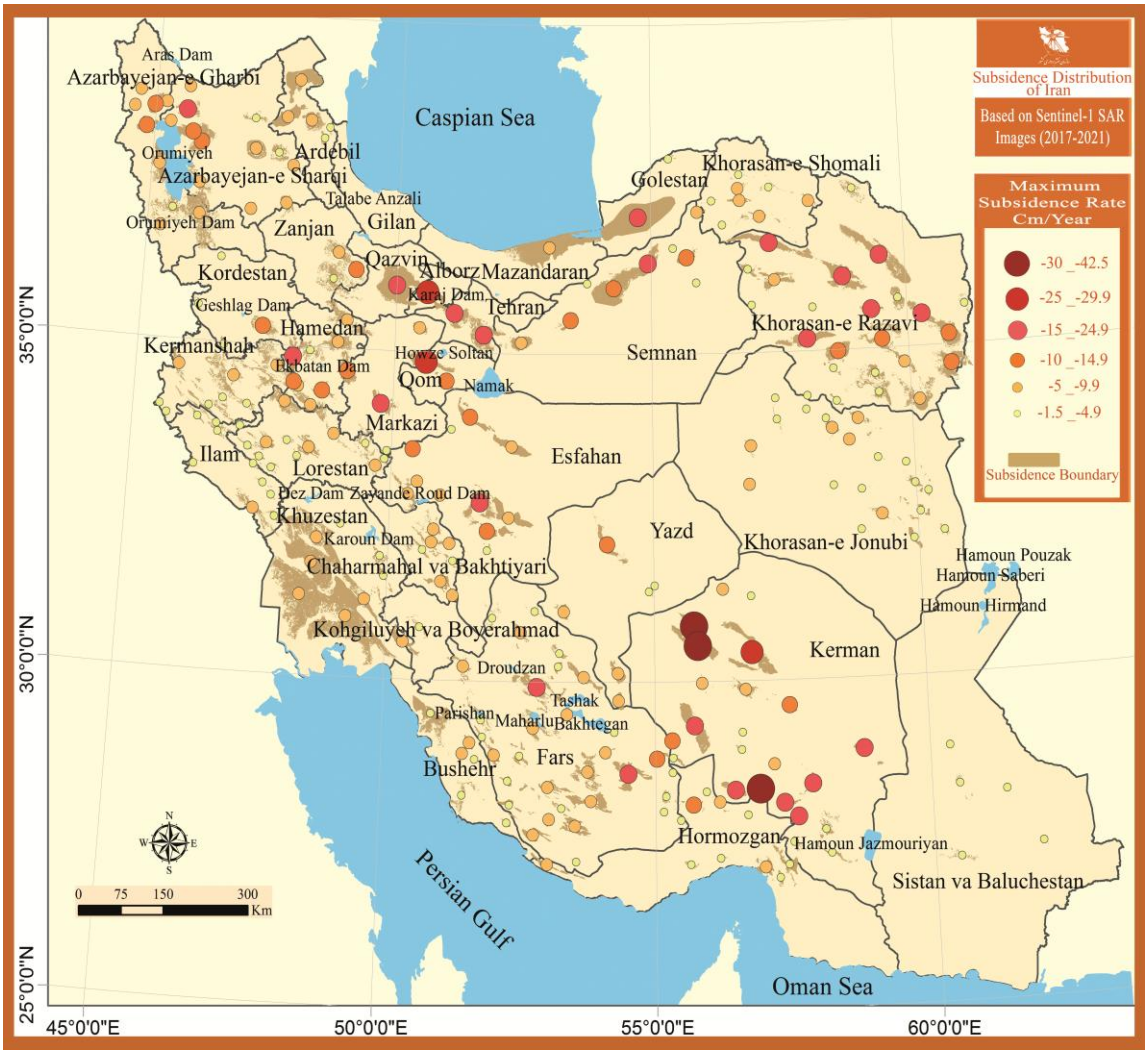


Fig. 3- Subsidence distribution map of Iran

شکل ۳- نقشه توزیع فرونشست ایران

۱۳۹۹ مربوط به استان کرمان با نرخی بیش از ۴۰ سانتی‌متر در سال بوده است و پس از آن به ترتیب استانهای البرز، قم، تهران، گلستان، خراسان رضوی، همدان و مرکزی دارای نرخ فرونشست بیشینه بالاتر از ۲۰ سانتی‌متر در سال بوده‌اند.

در مجموع ۷ درصد مناطق فرونشست کشور با تجربه نرخ فرونشست بیشینه بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال، حالت فوق بحرانی به خود گرفته‌اند. همچنین، ۱۷ درصد از مناطق فرونشست دارای نرخ فرونشست بیشینه در محدوده ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر در سال، ۳۳ درصد این مناطق دارای نرخ فرونشست بیشینه در محدوده ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال و ۴۳ درصد این مناطق دارای نرخ فرونشست بیشینه در محدوده ۲ تا ۵ سانتی‌متر در سال هستند. به‌عبارتی در یک چهارم موارد گزارش شده که دارای نرخ فرونشست بیشینه بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر در سال است، نیاز به رسیدگی و اقدام عاجل به منظور جلوگیری از پیشرفت فرونشست و ممانعت آسیب‌های بحرانی فرونشست است. از طرفی حدود نیمی از فرونشست‌های گزارش شده در مراحل آغازین شکل‌گیری هستند که با رسیدگی فوری و اقدامات پیشگیرانه، می‌توان آنها را در بازه زمانی کوتاه‌تری متوقف نمود.

از نظر مجموع مساحت مناطق درگیر فرونشست به ترتیب استانهای خوزستان، خراسان رضوی، کرمان، فارس، گلستان و سمنان بیشترین گستره مناطق تحت تأثیر فرونشست را داشته‌اند. همچنین، گسترده‌ترین پهنه فرونشست مربوط به استانهای ساحلی گلستان، خوزستان و مازندران بوده است.

بر اساس پردازش‌های انجام شده، بالغ بر ۸۰ هزار کیلومترمربع، یعنی بیش از ٪۵ مساحت کل کشور، تحت تأثیر این مخاطره با نرخ فرونشست بیش از یک سانتیمتر در سال قرار دارد. شهرستان بهرمان استان کرمان با بیشینه نرخ ۴۲ سانتی‌متر در سال دارای بیشترین نرخ فرونشست در کشور بوده و پهنه فرونشست زمین در استان گلستان به‌عنوان گسترده‌ترین پهنه با نرخ بحرانی فرونشست در کشور با مساحتی قریب به ۴۷۸۸ کیلومتر مربع و با نرخ فرونشست متوسط ۶ سانتیمتر در سال و نرخ بیشینه فرونشست ۲۳ سانتی‌متر در سال مورد توجه است.

شکل ۴ نقشه جامع فرونشست ایران را به همراه وضعیت آب زیرزمینی محدوده‌های مطالعاتی وزارت نیرو نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست اکثر مناطق فرونشست در دشتهای ممنوعه و ممنوعه بحرانی از نظر وضعیت سطح آب زیرزمینی وزارت نیرو اتفاق افتاده است.

همانطور که از شکل ۴ پیداست، ۷۰ درصد از محدوده‌های مطالعاتی وزارت نیرو ممنوعه و ممنوعه بحرانی، ۱۷ درصد فاقد پتانسیل و ۱۳ درصد آنها آزاد هستند. تنها استانهای گیلان و کهگلویه و بویر احمد فاقد محدوده‌های ممنوعه و ممنوعه بحرانی هستند که در استان کهگلویه و بویراحمد مواردی از آغاز فرونشست به دست آمده است. همچنین، مطابق این شکل، ۹۰ درصد محدوده‌های مطالعاتی ممنوعه و ممنوعه بحرانی و ۶۶ درصد از محدوده‌های آزاد دچار فرونشست زمین شده‌اند.

۴- بررسی وضعیت فرونشست کشور با رویکرد استانی

پس از دستیابی به نقشه جامع فرونشست کشور (شکل ۴) که در برگیرنده ۲۵۴ نقشه فرونشست در کشور بوده است (Amighpey et al., 2023)، نتایج نشان دهنده آن بود که تمام استانها به غیر از استان گیلان دچار فرونشستهای قابل توجهی هستند. به منظور تبیین بهتر نتایج، در این قسمت، وضعیت فرونشست استانها و وضعیت منابع آب زیرزمینی آنها مورد بررسی قرار گرفت. بحرانی‌ترین استان ایران از لحاظ بیشینه نرخ فرونشست، استان کرمان است که در دشت رفسنجان در اطراف شهرهای بهرمان و رفسنجان و در دشت سوغان در روستای سرخان و همچنین در دشت کرمان نرخ فرونشست بیشینه بالای ۳۰ سانتی‌متر در سال را تجربه می‌کند. همچنین، در دشتهای فاریاب و جیرفت و زرند و سیرجان و اطراف شهرهای کهنوج و فهرج و ارزوییه نرخ بیشینه فرونشست حدود ۲۰ سانتی‌متر در سال است. این مناطق طبق گزارش شرکت مدیریت منابع آب ایران همگی در دشتهای ممنوعه بحرانی از نظر وضعیت افت سطح آب زیرزمینی واقع شده‌اند (شکل ۴). از طرف دیگر تغییرات نرخ جابجایی در مکان و گرادیان مکانی جابجایی نیز در این مناطق بالا است و از آنجا که عمده آسیبهای وارده به مستحدثات و عوارض سطحی و شکافهای ایجاد شده در مناطق با گرادیان بالای فرونشست اتفاق می‌افتد، این مناطق از این نظر نیز جزء بحرانی‌ترین مناطق فرونشست کشور محسوب می‌شوند.

از نظر تعداد مناطق فرونشست نیز استان کرمان بعد از استان فارس دارای رتبه دوم است که ۲۵ منطقه فرونشست در این استان شناسایی شده است که از این تعداد، ۱۰ منطقه با نرخ بیشینه فرونشست بیشتر از ۱۷ سانتی‌متر در سال در وضعیت بسیار بحرانی از حیث نرخ و گرادیان فرونشست است. همچنین، ۶ منطقه با داشتن نرخ بیشینه فرونشست بین ۷ تا ۱۲ سانتی‌متر در سال در وضعیت بحرانی و ۹ منطقه نیز با داشتن نرخ بیشینه فرونشست کمتر از ۵ سانتی‌متر در سال در مراحل اولیه شکل‌گیری فرونشست است که اعمال سیاستهای مدیریت بهینه استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی می‌تواند مانع گسترش و بحرانی‌تر شدن آنها شود.

همچنین، این استان در دو معدن گل گوهر و مس سرچشمه نیز دارای نرخ بالای فرونشست حدود ۱۰ سانتی‌متر در سال است که می‌بایست به لحاظ ملاحظات امنیت معدن مورد توجه قرار گیرد. بررسی وضعیت آبخوان استان نشان‌دهنده آن است که به غیر از نیمه شرقی کویری استان، تمام دشتهای آن ممنوعه و ممنوعه بحرانی است. حدود ۵ درصد مساحت استان دچار فرونشست شده است، به نحوی که شهر کرمان، مرکز استان و بسیاری از شهرهای استان در منطقه فرونشست یا در حاشیه آن واقع شده‌اند.

استان البرز که از استانهای مطرح در حوزه تولیدات کشاورزی است نیز با نرخ بیشینه فرونشست نزدیک ۳۰ سانتی‌متر در سال و گرادیان بالای جابجایی، از فرونشستهای بحرانی کشور محسوب می‌شود که کلیه آبخوان‌های آن به جز طالقان ممنوعه بحرانی اعلان شده است و کلانشهر کرج و اکثریت شهرهای استان مانند تنکمان و نظرآباد و غیره در محدوده فرونشست یا در حاشیه آن واقع شده است. فرونشست دشت هشتگرد این استان در مجاورت فرونشست دشت شهریار و دشت ورامین در جهت غرب آن و فرونشست دشت قزوین در جهت شرق آن، محدوده وسیعی از وضعیت بحرانی فرونشست در کشور را تشکیل داده است.

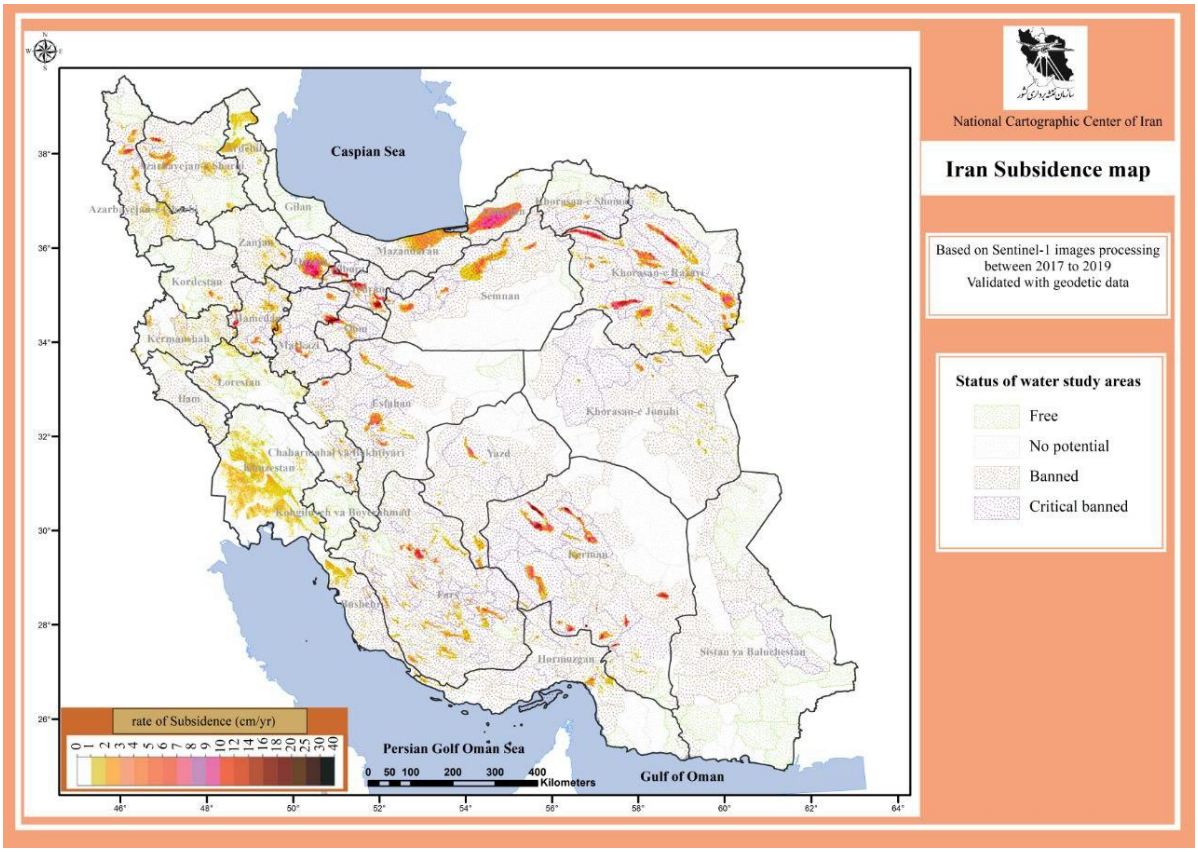


Fig. 4- The comprehensive map of subsidence of Iran along with the ground water resources status in the plains (based on the Ministry of Energy's classification)

شکل ۴- نقشه جامع فرونشست ایران به همراه وضعیت منابع آب زیرزمینی دشتهای وزارت نیرو

استان تهران با داشتن ۲ منطقه فرونشست جنوب غرب تهران و ورامین با نرخ بیشینه بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال جزء استانهای بحرانی فرونشست محسوب می‌شود که کلیه آبخوانهای آن ممنوعه و ممنوعه بحرانی اعلان شده است. اهمیت فرونشست این استان علاوه بر نرخ و گستره وسیع فرونشست، گسترش فرونشست به محدوده کلانشهر تهران و تهدید سازه‌ها و زیرساختهای شهری پایتخت ایران است.

فرونشست دشت جعفریه ما بین استانهای قم و مرکزی با نرخ بیشینه بحرانی ۲۷ سانتی‌متر در سال، این دو استان را نیز جزء استانهای بحرانی فرونشست قرار داده است. ضمن اینکه هر دو استان مناطق دیگری از فرونشست با بیشینه نرخ بیش از ۱۰ سانتی‌متر در سال را تجربه می‌کنند و فرونشست به مرز مراکز این استانها رسیده است. کلیه آبخوانهای این استانها ممنوعه و ممنوعه بحرانی اعلان شده است.

دیگر استان بحرانی فرونشست از حیث وسعت و نرخ، استان گلستان است که بیشینه نرخ حدود ۲۳ سانتی‌متر در سال را در مساحتی معادل یک چهارم مساحت استان تجربه می‌کند. مرکز استان شهر گرگان و بسیاری از شهرهای این استان در منطقه فرونشست واقع شده‌است. کلیه آبخوان‌های این استان دچار فرونشست شده‌اند. از طرفی، به لحاظ مجاورت منطقه فرونشست استان با دریای خزر، فرونشست این استان از لحاظ تأثیر منفی مضاعفی که بر ایجاد سیلاب در منطقه می‌گذارد باید مورد توجه قرار گیرد.

استان خراسان رضوی با ۲۴ منطقه فرونشست با میانگین نرخ بیشینه حدود ۱۰ سانتی‌متر در سال دیگر استان با وضعیت بحرانی فرونشست در کشور است که دشتهای مشهد، نقاب، رباط سنگ و کاشمر با بیشینه نرخ فرونشست حدود ۲۰ سانتی‌متر در سال و گرادیان بالای نرخ فرونشست حالت بحرانی گرفته است. مساحت محدوده درگیر استان ۷ درصد است که قابل توجه است. نرخ بیشینه بالای ۵ سانتی‌متر درسال اکثر مناطق فرونشست استان نشانه قدمت فرونشست‌های منطقه است. به علت استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی به منظور مقاصد کشاورزی، تمامی آبخوانهای این استان در وضعیت ممنوعه و ممنوعه بحرانی قرار گرفته‌اند. همچنین، فرونشست به داخل شهر مشهد و بسیاری از شهرهای استان گسترش یافته است.

استان قزوین نیز در دشت ممنوعه بحرانی قزوین فرونشست گسترده‌ای با بیشینه نرخ ۱۷/۵ سانتی‌متر در سال تجربه می‌کند که این فرونشست به نواحی مرزی شهر قزوین و بسیاری از شهرهای استان نیز رسیده است. استان فارس با داشتن ۳۴ منطقه فرونشست، که حدود ۷۰ شهر استان را در معرض آسیب‌های فرونشست قرار داده است، رکورددار بیشترین تعداد مناطق فرونشست است. این در حالی است که تمامی دشتهای قابل کشت استان ممنوعه و ممنوعه بحرانی است. دشتهای داراب و مرودشت با بیشینه نرخ فرونشست حدود ۱۷ سانتی‌متر در سال حالت بحرانی داشته و حدود ۶ درصد مساحت استان دچار فرونشست است. متوسط نرخ بیشینه استان ۶ سانتی‌متر درسال است که نشان‌دهنده تعدد مناطق فرونشست در حال شکل‌گیری و گسترش است. همچنین، فرونشست به حاشیه شهر شیراز، مرکز استان رسیده است.

نرخ بیشینه فرونشست بالای ۵ سانتی‌متر درسال نواحی فرونشست استانهای آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی و تعدد مناطق فرونشست در این استانها بیانگر قدمت رویداد فرونشست در این استانها است. بالاترین نرخ فرونشست در استان آذربایجان شرقی متعلق به دشت مرند است که بیشینه نرخ آن ۱۹ سانتی‌متر در سال هستند. همچنین، بالاترین نرخ فرونشست در استان آذربایجان غربی متعلق به دشت سلماس است که بیشینه نرخ آن ۱۴/۶ سانتی‌متر در سال است. کلانشهرهای تبریز و ارومیه در حاشیه فرونشست واقع شده است. همچنین، تعداد قابل توجهی از شهرهای این استانها در پهنه فرونشست واقع شده‌اند. اکثریت آبخوان‌های این استانها ممنوعه و ممنوعه بحرانی اعلان شده است.

استان اصفهان به علت وقوع بیش از یک دهه خشکسالی، در وضعیت هشدار کمبود آب قرار گرفته است و کشاورزی در استان به علت محدودیت منابع آبی با چالشی جدی مواجه شده است، به نحوی که بیشتر آبخوان‌های استان ممنوعه و ممنوعه بحرانی اعلان شده است. آثار کم آبی و عدم سازگاری بشر با این پدیده، خود را به‌صورت فرونشست‌های گسترده در مناطق کشاورزی استان نشان داده است، به طوری که دشت اصفهان–برخوار و گلپایگان بیشینه نرخ فرونشست ۱۵ سانتی‌متر درسال را تجربه می‌کنند و شهر فرهنگی–تاریخی اصفهان دچار پیامدهای نامطلوب فرونشست زمین شده است. حدود نیمی از این کلانشهر در محدوده فرونشست واقع شده است. بطور کلی ۱۵ منطقه فرونشست در این استان شناسایی شده است که ۶۳ شهر این استان را در معرض آسیب قرار داده است.

استان زنجان که یکی از استانهای پرآب ایران محسوب می‌شود نیز در اکثر آبخوان‌های خود دارای فرونشست شده است. فرونشست دشت خرمدره با نرخ بیشینه حدود ۱۳ سانتی‌متر در سال جز، نواحی پر مخاطره این استان است. سایر نواحی فرونشست این استان بیشینه نرخ حدود ۵ سانتی متر در سال را تجربه می‌کند.

نواحی فرونشست استان سمنان نیز با داشتن بیشینه نرخ در محدوده ۷ تا ۱۷ سانتی‌متر درسال، نشان‌دهنده تأثیر سوء مدیریت منابع آبی بر سطح زمین است. این نواحی فرونشست در زمینهای مستعد کشاورزی در نیمه شمالی استان دیده می‌شود. کلیه آبخوانهای فعال استان ممنوعه و ممنوعه بحرانی و دارای فرونشست است. فرونشست تا مرز شهر سمنان نیز گسترش یافته است.

استان کوهستانی کردستان نیز از پدیده فرونشست بی‌نصیب نبوده است. بیشینه نرخ فرونشست این استان در دشت قروه– دهگلان ۱۴ سانتی‌متر در سال بوده و چندین ناحیه فرونشست دیگر در استان در حال شکل‌گیری است.

در استان کویری یزد که یکی از خشک‌ترین نواحی ایران است، عدم سازگاری بشر با طبیعت خشک منطقه موجب فرونشست زمین در غالب مناطق کشاورزی استان شده است. بالاترین نرخ و گستره فرونشست استان مربوط به دشت یزد–اردکان بابیشینه نرخ ۱۴/۵ سانتی‌متر در سال است که یک فرونشست با قدمت محسوب می‌شود. آبخوان‌های هرات و ابرکوه با بیشینه نرخ حدود ۷ سانتی‌متر درسال اولویت بعدی مخاطره فرونشست در منطقه هستند. سایر نواحی استان نرخ فرونشست کمتر از ۵ سانتی‌متر در سال را تجربه می‌کنند. همچنین، در این استان فرونشست در اثر استخراج معادن نیز اتفاق افتاده است.

سرزمین کوهستانی استان لرستان دارای بیشینه نرخ فرونشست ۱۳ سانتی‌متر در سال در مناطق کشاورزی اطراف چالانچولان و ۷/۵ سانتی‌متر در سال در دشت کوهدشت بوده و در بیشتر آبخوانهای استان شاهد فرونشست با نرخ بیشینه حدود ۵ سانتی‌متر در سال هستیم. ضمناً گستره فرونشست به نزدیکی خرم آباد، مرکز استان رسیده است.

در استان همدان که نماد تشکیل فروچاله های وسیع در کشور است، مساحت وسیعی از استان دچار فرونشست است. به نحوی که تقریبا تمام آبخوانهای استان دچار فرونشست است. بالاترین نرخ فرونشست حدود ۱۲ سانتی‌متر در سال مربوط به آبخوان‌های اسدآباد، ملایر و

کمیجان است و سایر نواحی مانند دشت کبودر آهنگ دارای نرخ بیشینه حدود ۵ سانتی‌متر در سال است. تقریباً همه آبخوان‌های این استان ممنوعه و ممنوعه بحرانی است.

استان ساحلی هرمزگان از دیگر استانهای دارای فرونشست است که بیشینه نرخ فرونشست این استان در آبخوان کهکم سعادت آباد، حدود ۱۱ سانتی‌متر در سال است. همچنین، این استان در آبخوان‌های ساحلی گاوبندی و میناب دارای فرونشست با نرخ بیشینه ۶/۵ سانتی‌متر در سال است که از حیث مخاطرات سیلاب مورد تهدید جدی هستند. همچنین، این استان دارای مناطق متعدد فرونشست زیر ۵ سانتی‌متر در سال است. اکثریت آبخوان‌های این استان ممنوعه است.

استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی بام ایران که استان چهار محال و بختیاری است را نیز متأثر نموده و این استان نیز دارای مناطق متعدد فرونشست با نرخ بیشینه ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال است. تمامی آبخوان‌های استان به غیر از آبخوان‌های بن وسامان ممنوعه و ممنوعه بحرانی است که این دو آبخوان نیز دچار فرونشست شده‌اند. فرونشست به مرز شهرکرد، مرکز استان نیز رسیده است.

متأسفانه مساحت قابل توجهی از زمینهای مستعد کشاورزی در استان پربارش کرمانشاه نیز دچار پدیده فرونشست زمین شده‌اند، به‌گونه‌ای که تمام آبخوان‌های استان درگیر پدیده فرونشست هستند. بیشینه نرخ فرونشست این استان در اطراف کنگاور با نرخ ۱۰ سانتی‌متر در سال بوده و در سایر آبخوان‌های استان نیز شاهد فرونشست با بیشینه نرخ حدود ۵ سانتی‌متر در سال هستیم.

استان خراسان شمالی با داشتن مناطق دارای نرخ بیشینه فرونشست بیشینه بین ۲ تا ۹ سانتی‌متر در سال، استانی با تلفیق فرونشست‌های قدیمی و فرونشست‌های در حال شکل‌گیری است. اکثریت آبخوان‌های استان دچار فرونشست شده است. فرونشست به مرز مرکز استان، شهر بجنورد نیز رسیده است.

نرخ بیشینه حدود ۵ سانتی‌متر در سال و گستره وسیع مناطق فرونشست استانهای اردبیل و بوشهر نشان‌دهنده مراحل آغازین شکل‌گیری فرونشست در این استانها است که مسلماً اتخاذ سیاستهای صحیح و مدیریت استخراج آب زیرزمینی نقش مؤثری در جلوگیری از رشد این پدیده در این استانها خواهد داشت. علاوه بر آبخوان‌های ممنوعه، آبخوان‌های آزاد این استانها نیز دچار فرونشست شده است. همچنین، تعدد مناطق فرونشست با نرخ بیشینه کمتر از ۵ سانتی‌متر در سال در استان ایلام نشان دهنده مراحل آغازین فرونشست در این استان است.

استان خراسان جنوبی با داشتن ۲۰ منطقه فرونشست که نرخ بیشینه فرونشست در اکثریت این مناطق کمتر از ۳ سانتی‌متر در سال است، نشان دهنده روند آغازین شکل‌گیری مناطق فرونشست در این استان است. بالاترین نرخ فرونشست استان در اطراف شهرهای تیغاب، آیسک و خضری حدود ۸ سانتی‌متر در سال است. کلیه آبخوانهای استان ممنوعه و ممنوعه بحرانی است. همچنین، در این استان نیز فرونشست در اثر استخراج معادن اتفاق افتاده است.

آبخوان‌های شرقی و مرکزی استان حاصل خیز مازندران نیز با نرخ متوسط فرونشست حدود ۳ سانتی‌متر در سال و نرخ بیشینه فرونشست ۱۰ سانتی‌متر در سال در جنوب شهر زرگر محله مواجه هستند. کلیه آبخوان‌های این استان ممنوعه اعلان شده است.

استان خوزستان که یکی از مستعدترین و فعال ترین نواحی کشاورزی ایران محسوب می‌شود، فرونشست‌های گسترده‌ای با نرخ بیشینه حدود ۵ سانتی‌متر در سال، در اثر استخراج مواد نفتی و آب زیرزمینی را تجربه می‌کند که با توجه به ماهیت ساحلی بودن استان، افزایش پتانسیل سیل‌خیزی استان در اثر فرونشست‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. ضمناً دامنه فرونشست این استان به داخل شهر اهواز و بسیاری از شهرهای استان کشیده شده است.

استان کوهستانی کهگیلویه و بویر احمد نیز در دو دشت دهدشت و لیشتر دارای فرونشست با بیشینه نرخ حدود ۵ سانتی‌متر در سال است. همچنین، استان سیستان و بلوچستان، کم آب‌ترین استان ایران نیز دارای فرونشست‌هایی با بیشینه نرخ در بازه ۲ تا ۳ سانتی‌متر در سال در مناطق کشاورزی است.

۵- بحث

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که متأسفانه روند استخراج بی‌رویه آبهای زیرزمینی طی سالیان متمادی منجر به فرونشست بیش از ۵ درصد از مساحت ایران زمین شده است که متأسفانه این ۵ درصد، شامل ۶۰ درصد اراضی کشاورزی کشور است. علل فرونشست در اثر فعالیتهای انسانی در جهان مربوط به استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی، استخراج نفت و گاز و معدن کاری است. نتایج این مطالعه نشان داده است که ۹۷ درصد فرونشست زمین در ایران در اثر سوء مدیریت روند استخراج منابع آب زیرزمینی اتفاق افتاده است. از آنجایی که یکی از

مخرب‌ترین آثار فرونشست تخریب آبخوان منطقه و تبدیل زمین‌های کشاورزی به سیمای بیابانی است، اتفاقی که در بسیاری از زمینهای کشاورزی و به عنوان نمونه در زمینهای کشاورزی ورامین در حال رویداد است، این موضوع لزوم جلوگیری از گسترده‌تر شدن پدیده فرونشست را آشکار می‌سازد.

از طرف دیگر، یکی دیگر از آثار مخرب فرونشست ایجاد تخریب در شریان‌های حیاتی و سازه‌های مهم و خطوط انتقال نیرو است. از آنجا که مناطق فرونشست اکثراً در حاشیه شهرها اتفاق افتاده و غالباً شاهد گسترش حریم فرونشست به مناطق مسکونی هستیم، بطوری‌که در ۱۶ کلانشهر شاهد نفوذ پهنه فرونشست به داخل شهر و در ۸ کلانشهر شاهد رخداد فرونشست در حاشیه شهر هستیم. از این میان کلانشهرهای کرمان، گرگان، مشهد، تهران و اصفهان بیشترین مساحت و نرخ متأثر از پدیده فرونشست را تجربه می‌کنند. جلوگیری از پیشرفت این پدیده به منظور به حداقل رساندن آثار سوء این پدیده به مناطق شهری امری اجتناب‌ناپذیر در مدیریت شهری است.

نکته قابل توجه دیگر در مدیریت پدیده فرونشست در استانها تعدد دشتهای دارای فرونشست در هر استان است، که استان فارس با ۳۴ منطقه دچار فرونشست بیشترین و پس از آن استانهای کرمان و خراسان رضوی و خراسان جنوبی دچار بیشترین تعداد دشتهای در حال فرونشست هستند. همچنین، کرمان و خراسان رضوی رکورددار تعدد مناطق فرونشست با نرخ بالا هستند. از دیگرسو استان خراسان جنوبی با داشتن نرخ بیشینه میانگین ۴ سانتی‌متر در سال در سطح استان از یک سو و تعداد بالای مناطق فرونشست از سوی دیگر نشان دهنده آغاز فرونشست بصورت گسترده است که سرعت بخشی به مدیریت منابع آبی در این استان در جهت حذف و مدیریت این پدیده موجب جلوگیری از بحرانی شدن این استان از حیث منابع آبی و خاکی است. همچنین، استان فارس که رکورددار بیشترین مناطق فرونشست با نرخ بیشینه میانگین ۶ سانتی‌متر در سال است، نیازمند توجه جدی در زمینه مدیریت استخراج منابع آب زیرزمینی است.

از آنجایی که توسعه بی‌برنامه کشاورزی منجر به افت شدید سطح آب در آبخوانهای کشور و فرونشست زمین شده است، اتخاذ سیاستهای پایدار در زمینه خودکفایی تولید محصولات کشاورزی تنها راه نجات کشور از وضعیت بحرانی آب و فرونشست است. اتخاذ روشهای آبیاری با حداقل هدر رفت، اجرای سیاستهای الگوی کشت و ممانعت از کشت محصولات پر آب بر در مناطق بحرانی فرونشست، جلوگیری از هدررفت محصولات کشاورزی تنها راه توسعه پایدار و همه‌جانبه کشور است. در این راستا، پیگیری، نظارت و آسیب‌شناسی برنامه‌های کمیته ملی سازگاری با کم آبی (Zahraee, 2021)، می‌تواند در زمینه مدیریت بحران آب و فرونشست در کشور راهگشا باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نقشه جامع فرونشست کشور با تلفیق انواع مشاهدات ژئودتیک در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ به دست آمده است. بر این اساس مناطق بحرانی با نرخ و گستره وسیع فرونشست و مناطقی که به تازگی درگیر این پدیده شده‌اند، در کلیه استانهای ایران شناسایی شده است. بدیهی است هرگونه اصلاح عملکرد و اقدام در جهت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، آثار خود را بر کاهش نرخ و وسعت فرونشست مناطق نشان خواهد داد و از دیگر سو عدم اعمال روشهای آبخیزداری، اصلاح الگوی کشت، اصلاح روشهای آبیاری و تغذیه مصنوعی منجر به گسترش فرونشست و نهایتاً مرگ آبخوانها خواهد شد. لذا به‌روزرسانی نقشه جامع فرونشست می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در زمینه تأثیرات اصلاح عملکرد و یا عدم تغییر رویکرد در مدیریت منابع آب زیرزمینی در اختیار قرار دهد.

۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله تشکر خود را از حمایت مالی و امکان دسترسی به داده‌های ژئودتیک مورد نیاز این مطالعه توسط سازمان نقشه‌برداری کشور ابراز می‌دارند. همچنین، از همکاری صمیمانه دفتر اطلاعات و داده‌های آب کشور شرکت مدیریت منابع آب ایران که امکان دسترسی به وضعیت دشتهای کشور و تغییرات سطح آبخوان را برای انجام این تحقیق فراهم نموده است، سپاسگزاری و قدردانی می‌شود.

۸- مراجع

Amighpey M, Arabi S, Talebi A, Jamoor Y (2008) Studying subsidence area in Iran applying precise leveling remeasurement. Surveying 20(4):5-15 (In Persian)

Amighpey M, Arabi S (2016) Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements. Remote Sensing Applications: Society and Environment 4:1-8

Amighpey M, Arabi S (2023) Comprehensive Iran subsidence atlas. National Cartographic Center of Iran, Tehran (In Persian)

Bagheri M, Dehghani M, Esmaeili A, Akbari V (2019) Assessment of land subsidence using interferometric synthetic aperture radar time series analysis and artificial neural network in a geospatial information system case study of Rafsanjan Plain. Journal of Applied Remote Sensing 13(4):44-53

Dehghani M, Valadan Zoej M J, Entezam I, Mansourian A, & Saatchi S (2009) InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. Geophysical Journal International 178(1):47-56

Galloway D L, Sneed M (2013) Analysis and simulation of regional subsidence accompanying groundwater abstraction and compaction of susceptible aquifer systems in the USA. Boletín de la Sociedad GeolóGica Mexicana 65(1):123–136

Salehi R, Ghafoori M, Lashkaripour G R, Dehghani M (2013) Evaluation of land Subsidence in Southern Mahyar Plain Using Radar Interferometry. Irrigation and Water Engineering 3(3):47-57

Ghayournajarkar N, Fukushima Y (2022) Using InSAR for evaluating the accuracy of locations and focal mechanism solutions of local earthquake catalogues. Geophysical Journal International 230(1):607-622

Poland M P, Zebker H A (2022) Volcano geodesy using InSAR in 2020: The past and next decades. Bulletin of Volcanology 84(3):27

Manafiazar A, Khamehchiyan M, Nadiri A A, Sharifikia M (2023) Learning simple additive weighting parameters for subsidence vulnerability indices in Tehran plain (Iran) by artificial intelligence methods. European Journal of Environmental and Civil Engineering 28(1):108-127

Motagh M, Walter T R, Sharifi M A, Fielding E, Schenk A, Anderssohn J, Zschau J (2008) Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. Geophysical Research Letters 35(16)

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

Wu J, Shi X, Xue Y, Zhang Y, Wei, Z, Yu J (2008) The development and control of the land subsidence in the Yangtze Delta, China. Journal of Environmental Geology 55(8):1725–1735

Zahraee Z (2021) National adaptation program to dehydration. Ministry of Energy, 120p (In Persian)