



## The Performance of the Evidence Weighting in GIS for Determining the Effective Factors on the Land Subsidence in Qazvin Plain

M. Janbaz Fotamy<sup>1\*</sup>, M. Kholghi<sup>2</sup>, A. Abdeh Kolahchi<sup>3</sup>, and M. Roostaei<sup>4</sup>

### Abstract

Nowadays, intensified consolidation and land-subsidence led to irreparable damages to financial, environmental and human resources. In this research, land subsidence rate was investigated according to the impacts of the main factors of the aquifer including the geological and hydrodynamic characteristics. Long-term subsidence map was prepared for Qazvin plain based on SENTINEL-1 satellite data from 2015 to 2021 using Differential Interferometry SAR (D-InSAR) method. The maximum of land subsidence value in Qazvin Plain during 2015 to 2021 was equal to 47 cm occurred in southwest areas of the Qazvin province. The subsidence spatial distribution was analyzed according to the Weight-of-Evidence (WoE) method to reveal the aquifer characteristic effects. The water-table decline, hydraulic conductivity, slope, land use, fine-grained soil thickness, geology, and bedrock depth were used in WoE method to determine the impact of each factor on subsidence. The results of WoE, land subsidence hazard potential maps were validated using Receiver Operating Characteristic (ROC) diagram. The most effective land subsidence factor in the Qazvin plain were the thickness of fine-grained soil with a value of 3.77, while the influence of water level decline was ranked fourth. The land subsidence potential hazard map was able to predict the future land subsidence with an accuracy of 0.87 that indicated a very good prediction. Although water table decline was responsible for the land-subsidence in general, the results of this study indicated that the thickness of fine-grained soil layer was the most effective factor on the land-subsidence phenomenon.

**Keywords:** Land-Subsidence, Impact Factors, Weight of Evidence, ROC Curve, GIS.

Received: May 21, 2023

Accepted: July 25, 2023

## کارایی روش وزن دهی شواهد در محیط GIS، در تعیین فاکتور مؤثر بر فرو نشست دشت قزوین

مهديه جانباز فوتمی<sup>۱\*</sup>، مجید خلقی<sup>۲</sup>، عبدالنبی عبده کلاهیچی<sup>۳</sup> و مه آسا روستایی<sup>۴</sup>

### چکیده

تحکیم و فرونشست در دشت قزوین که در سال‌های اخیر تشدید شده است می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیر جانی، محیط‌زیستی و مالی ایجاد نماید. عوامل متعددی مانند خصوصیات زمین‌شناسی منطقه و شرایط آبخوان بر میزان فرونشست تأثیرگذار هستند، لذا جهت مدیریت فرونشست، شناخت پارمترهای مؤثر بر آن و میزان ارتباط آنها با هم ضروری است. در این مطالعه برای محاسبه بلندمدت فرونشست از داده‌های سنجنده SENTINEL-1 در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ و روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR) استفاده شده است. بیشترین مقدار فرونشست دشت قزوین در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱، برابر با ۴۷ سانتی متر بوده است که در جنوب غربی استان رخ داده است. تأثیر فاکتورهای مؤثر بر فرونشست با بررسی فاکتورهای افت سطح ایستابی، هدایت‌هیدرولیکی، شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، ضخامت لایه‌ریزدانه، زمین‌شناسی و جنس لایه‌های آبخوان با استفاده از رویکرد وزن دهی شواهد (Weight of Evidence, WoE) بر توزیع مکانی و مقدار فرونشست در محیط GIS سنجنده شده است و توسط نمودار ویژگی عملکرد گیرنده (Receiver Operating Characteristic, ROC) نتایج آن صحت‌سنجی شد. نتایج نشان دادند مؤثرترین فاکتور بر فرونشست دشت قزوین با مقدار ۳/۷۷ متعلق به ضخامت لایه ریزدانه آبخوان بوده است و کاهش سطح ایستابی در رده چهارم تأثیرگذاری بوده است. همچنین، نقشه پتانسیل خطر فرونشست که با استفاده از مجموع وزنی فاکتورهای مؤثر به دست آمد توانست با دقت مناسب ۰/۸۷ توزیع مکانی فرونشست آینده را خیلی خوب پیش‌بینی نماید. در نهایت نتیجه می‌شود با آنکه تغییرات سطح ایستابی جز عوامل شروع کننده فرونشست است، اما شدت و گسترگی آن به ضخامت لایه ریزدانه در منطقه بسیار وابسته است.

**کلمات کلیدی:** فرونشست زمین، فاکتورهای مؤثر بر فرونشست، روش وزن دهی شواهد، نمودار مشخصه عملکرد، محیط GIS، دشت قزوین.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۲/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۵/۳

1- Ph.D. of Water Resource Management, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ma\_janbaz@ut.ac.ir

2- Professor, Irrigation & Reclamation Eng. Dept, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mkholghi@gmail.com

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

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

\*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1402.19.3.8.7](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1402.19.3.8.7)

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

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

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 تابستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.



همچنین، آنها با مقایسه بین وسعت و الگوی فرونشست اتفاق افتاده در این منطقه بیان کردند فرونشست درست در همان مناطقی که تراکم این چاهها زیاد است، اتفاق افتاده است. Janbaz Fotamy et al. (2020) ارزیابی بلندمدت فرونشست با استفاده از داده‌های ماهواره‌های Envisat، Alos Palsar و Sentinel را انجام دادند. آنها همچنین تغییرات تراز سطح ایستایی آبخوان قزوین را با استفاده از داده‌های ۱۸۰ چاه مشاهده‌ای مورد بررسی قرار دادند. 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. Sekkeravani et al. (2022) مکان‌های فرونشست زمین را در دشت‌های استان فارس با استفاده از سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) بدست آوردند. سپس ارتباط بین مکان‌های فرونشست زمین با عوامل مؤثر شامل درصد شیب، جهت شیب، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، انحنای پلان، شاخص رطوبت توپوگرافی، زمین‌شناسی (واحد‌های سنگ شناسی)، فاصله از گسل‌ها و تغییرات سطح آب زیرزمینی را سنجش نمودند. نتایج نشان داد که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرونشست زمین به ترتیب تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، کاربری اراضی، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و شاخص رطوبت توپوگرافی است. Tzampoglou et al. (2023) در ۹ کشور دنیا من جمله ایران پدیده فرونشست زمین ناشی از بهره‌برداری بیش از حد از سفره‌های زیرزمینی مرور نمودند. آنها پدیده فرونشست زمین را به صورت تنگاتنگ با فعالیت‌های انسانی، افزایش تصاعدی تولیدات صنعتی و کشاورزی و همچنین شهرنشینی، تغییرات آب و هوایی و بهره‌برداری بیش از حد آبخوان مرتبط دانستند و بر نقش توسعه پایدار تکیه کردند. در این مطالعات اهمیت بررسی فرونشست با توجه به فاکتورهای مؤثر نشان داده شده است. در این راستا باید روش‌های مناسبی جهت تعیین ارتباط پدیده‌ها و صحت‌سنجی آنها استفاده گردد.

یکی از روش‌های تحلیل ارتباط مکانی بین داده‌ها و ایجاد روش پیش‌بینی وزن‌دهی شواهد<sup>۲</sup> (WoE) است. وزن‌دهی شواهد، به عنوان یک الگوی پیش‌بینی مهم، در پیش‌بینی منابع معدنی، زمین لغزش، اکتشاف طلا داده‌های زمین‌شناسی موفقیت‌آمیز بوده است (Fan, 2011). نمودار ویژگی عملکرد گیرنده<sup>۴</sup> (ROC) نشان‌دهنده همه ترکیبات احتمالی انواع مختلف تصمیمات صحیح و نادرست در یک مدل است (Metz, 1978).

فرونشست<sup>۱</sup> حرکات قائم رو به پایین سطح زمین بدون محدودیت در سرعت، بزرگی یا ناحیه وقوع پدیده است که با بردار اندک افقی نیز همراه است (Becker, 2006). خسارت‌های فرونشست شامل تخریب سیستم‌های آبیاری، تخریب خاک‌های حاصل خیز کشاورزی، تخریب چاه‌ها، آسیب به خیابان‌ها، پل‌ها و بزرگ‌راه‌ها، خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب‌ها، تخریب ساختمان‌ها و تغییر توپوگرافی و خصوصیات هیدرولوژی خاک است (Alipour et al., 2008; Strozzi, 2010). برای اندازه‌گیری فرونشست روش ترازیبی دقیق‌ترین و قدیمی‌ترین روش و روش‌های ماهواره‌ای ارزان و بزرگ مقیاس با دقت مناسب هستند (Gong, 2014; Haghightmehr, 2011). از علل فرونشست زمین می‌توان به عواملی چون برداشت بی‌رویه و نامناسب از آب‌های زیرزمینی، نحوه پمپاژ، هدایت هیدرولیکی لایه‌ها، بارندگی، دما، ضخامت و جنس لایه‌های آبخوان، کاربری زمین و تغییرات آن، احداث بهره‌برداری و یا بارگذاری سازه‌های مهندسی و زهکشی خاک های آلی، زلزله، زمین لغزش و احداث معدن اشاره نمود (Hoffmann, 2003; Lien, 2008; Amighpay et al., 2009; Goyal, 2010; Mahmoudpour et al., 2016; Tzampoglou et al., 2023).

از عمده عوامل فرونشست افت سطح ایستایی است که Hasanuddin et al. (2001)، فرونشست زمین را در جاकारتا اندونزی به دو روش نقشه برداری و GPS اندازه‌گیری نمودند. نتایج این مطالعه با داده‌های هیدرولوژیکی نشان می‌دهد که فرونشست زمین در جاकारتا به شدت با استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی مرتبط است. (Abidin et al. 2010) با روش‌های تسطیح نقشه‌برداری، GPS و InSAR فرونشست زمین در جاकारتا را مطالعه نمودند. مطالعات نشان دادند تغییرات مکانی و زمانی فرونشست زمین با استخراج آب‌های زیرزمینی، ویژگی‌های لایه‌های رسوبی و بارهای ساختمانی بالای آن ارتباط دارد. (Cigna et al. 2012) فرونشست زمین را در مورلی مکزیک با استفاده از تصاویر ماهواره ENVISAT (SAR) در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و به دو روش تداخل سنجی SAR (InSAR) و تداخل سنجی پراکنده پایدار<sup>۲</sup> بررسی نمودند. آنها مناطق فرونشست را مرتبط با مناطق استخراج شدید آب‌های زیرزمینی و خطوط گسل‌ها دانستند و بیان نمودند نرخ فرونشست یک همبستگی مثبت ضعیف با ضخامت کل رسوبات تراکم‌پذیر نشان داده است. (Babae et al. 2016) نشان دادند یک قسمت بزرگی از دشت قزوین به علت برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی برای مقاصد کشاورزی، شرب و صنعتی با مسأله فرونشست مواجه است. ماکزیمم دامنه فرونشست در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ حدود ۳۰ تا ۳۵ میلی‌متر در سال در دشت قزوین به دست آمد.

## ۲- مواد و روش‌ها

گام‌های اجرایی پژوهش مطابق شکل ۱ است. در ابتدا فرونشست دشت قزوین به صورت تجمعی برای سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ و ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ به دست آمده است. سپس، فاکتورهای مؤثر بر فرونشست دشت قزوین سنجیده شد و نقشه آنها در محیط GIS ترسیم گردید. با استفاده از مدل وزن‌دهی شواهد و مقدار تجمعی فرونشست زمین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸، وزن هر یک از فاکتورهای مؤثر بر فرونشست محاسبه گردید و سپس نقشه پتانسیل خطر فرونشست دشت قزوین بر اساس وزن دهی تمام فاکتورهای مؤثر ترسیم گردید. در انتها به کمک نمودار ROC صحت نقشه پتانسیل خطر فرونشست دشت قزوین با مقدار تجمعی فرونشست زمین سالهای ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ مورد ارزیابی قرار گرفت.

### ۲-۱- محدوده مورد مطالعه

استان قزوین به عنوان یکی از قطبهای کشاورزی مدرن، دشتی با قدمت ۷۰۰ ساله در کشاورزی است که از دیرباز دارای شبکه آبیاری و ابزارهای مدیریت آب و اندازه‌گیری بوده است (Akhavizadegan, 2002). این دشت 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 (شکل ۲).

### ۲-۲- محاسبه فرونشست

برای محاسبه فرونشست دشت قزوین از SARscape ENVI و روش تداخل سنجی راداری (D-InSAR) استفاده شده است (Janbaz et al., 2020). برای محاسبه فرونشست سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱، ۶ زوج تصویر استفاده شده است که در جدول ۱ نمایش داده شده است.

برای ارزیابی پارترهای مؤثر بر فرونشست، مقادیر فرونشست به دو بخش تقسیم شد. نقشه مقدار تجمعی فرونشست زمین سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ برای استفاده در روش WoE و نقشه فرونشست ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ برای صحت‌سنجی با ROC استفاده شده است که به ترتیب در شکل ۳ الف و ب نمایش داده شده است.

Atterberg, Bonham-Carter et al. (1988, 1994 and 1990) و Thiart et al. (2003) و Bonham-Carter and (1993) وزن‌دهی شواهد و استفاده از GIS در پیدا کردن معادن و کانی‌ها پرداختند. Oh and Lee (2010) روش وزن‌دهی شواهد را به عنوان یکی از مدل‌های احتمال بیزی در ارزیابی خطر فرونشست در نزدیکی معادن زغال سنگ زیرزمینی متروکه AUCM در کره در محیط نرم‌افزار ArcMap-GIS استفاده نمودند. در نهایت نتایج تجزیه و تحلیل با استفاده از ROC با مکان‌های فرونشست زمین قبلی ارزیابی شد. (Shahi and Kamkar Rouhani (2014) از روش وزن‌دهی شواهد برای یافت موقعیت احتمالی معدن طلا در منطقه تربت حیدریه، شرق ایران استفاده نمودند. (Mohammady et al. (2019 مکانهای فرونشست زمین با تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و بررسی‌های میدانی مشخص نمودند و دوازده عامل شامل توپوگرافی، زمین شناسی، کاربری اراضی و سطح آب زیرزمینی برای مدل‌سازی در نظر گرفته‌اند. نتایج کارایی WoE و ROC را نمایش دادند. (Faryabi (2023) فرونشست زمین در دشت جیرفت در جنوب شرق ایران را با استفاده از منطق فازی و فاکتورهای زمین شناسی، نوع خاک، نوع آبخوان، محیط اشباع و غیر اشباع، قابلیت انتقال، افت آب زیرزمینی، ضخامت سفره، سرعت پمپاژ آب زیرزمینی و فاصله تا گسل، ارتفاع، شیب و کاربری اراضی بررسی نمود. نتایج کار با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شده است و پهنه‌بندی خطر به دست آمد.

با توجه به سابقه مطالعاتی فرونشست در دشت قزوین به علت افت سطح ایستابی بسیار قابل توجه است، اما اثر سایر فاکتورهای مؤثر بر فرونشست دشت قزوین دیده نشده است. بدین منظور هدف از پژوهش حاضر بررسی فرونشست دشت قزوین در سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ با استفاده از سنجنده راداری SENTINEL-1 و روش تداخل سنجی راداری است. همچنین، فاکتورهای مؤثر بر فرونشست دشت قزوین سنجیده شد و به وسیله روش وزن‌دهی شواهد، وزن هر فاکتور بر فرونشست قزوین دیده شده است. در انتها نقشه خطر فرونشست به وسیله وزن فاکتورهای مؤثر ترسیم شد و توسط نمودار ویژگی عملکرد گیرنده با فرونشست آتی مقایسه و صحت سنجی شده است. جهت انجام این پژوهش روابط وزن‌دهی شواهد و نمودار ویژگی عملکرد گیرنده برای استفاده در محیط GIS به صورت مکانی فرمول‌بندی شده و بازنویسی شده است.

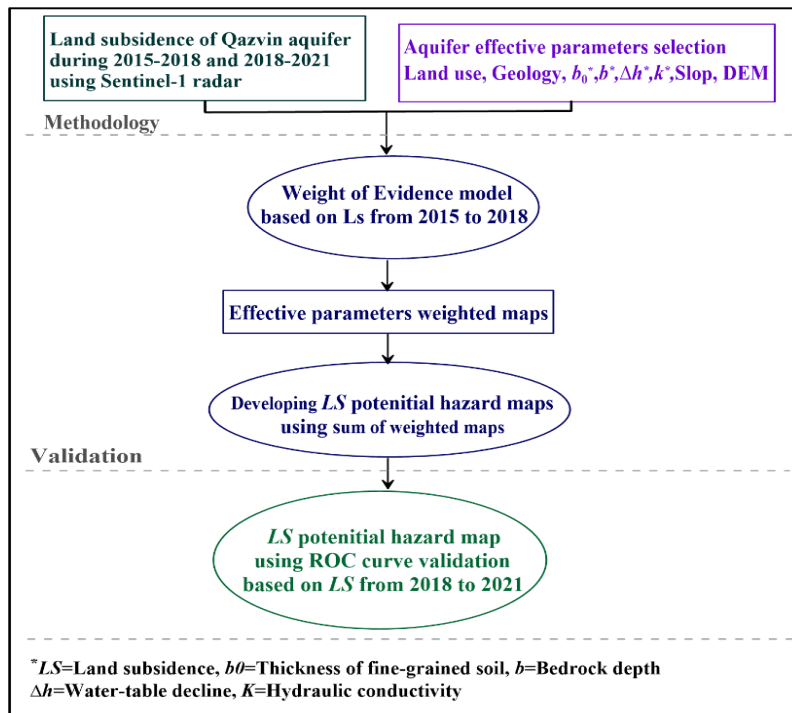


Fig. 1- Flowchart of research implementation steps

شکل ۱- نمودار جریان گام‌های انجام پژوهش

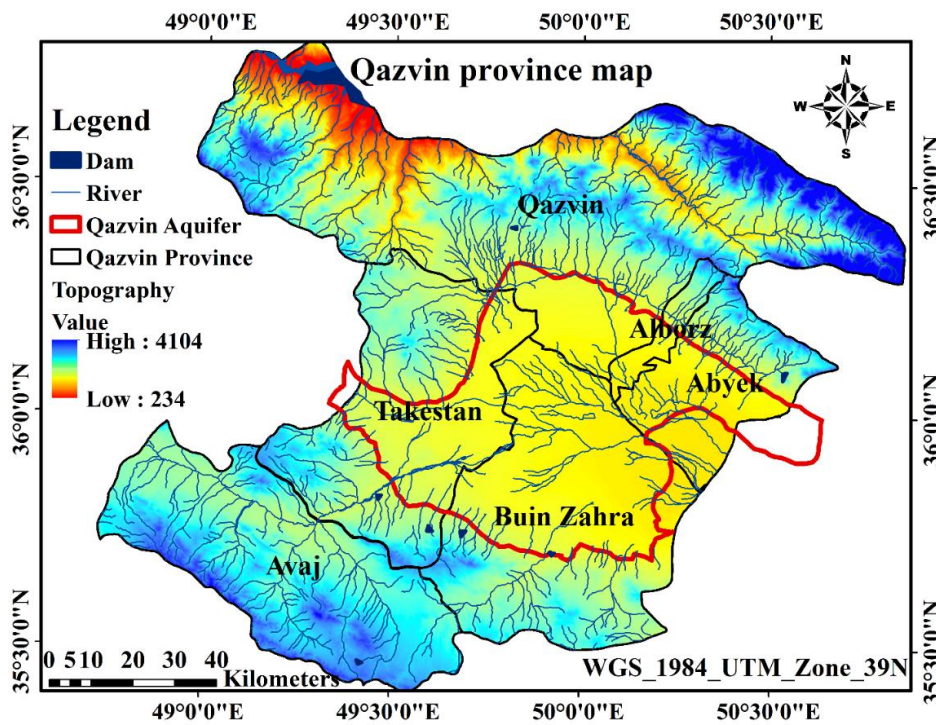


Fig. 2- Qazvin Province map

شکل ۲- نقشه استان قزوین

Table 1-The pairs of the SENTINEL-1 images used for measuring land subsidence

جدول ۱- زوج تصاویر راداری SENTINEL-1 جهت محاسبه فرونشست

No.	Path and Frame	Time data master Acquired	time Data slave Acquired
1	108,471	12/31/2015	11/18/2014
2	108,472	12/25/2016	12/31/2015
3	108,472	12/20/2017	12/25/2016
4	108,472	1/7/2018	1/2/2019
5	108,472	1/2/2019	1/9/2020
6	108,472	1/9/2020	1/3/2021

نقشه فرونشست (شکل ۳) نشان می‌دهد در غرب آبخوان و شهرستان بویین زهرا بیشترین فرونشست‌ها وجود دارد. بیشینه فرونشست سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ حدود ۲۷- سانتی‌متر و بیشتر از بیشینه فرونشست سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ که حدود ۲۰- سانتی‌متر می‌باشد، است. در استان قزوین داده‌برداری GPS وجود ندارد. ترازبایی‌های استان قزوین نیز در دو دوره ۱۳۷۲ و ۱۳۸۸ در مسیرهای مختلف انجام شده است. موقعیت ایستگاه‌های ترازبایی موجود در محدوده آبخوان در شکل ۴-الف نمایش داده شده است. از تفاضل ترازبایی‌ها فرونشست ۱۶ ساله محاسبه شده و در شکل ۴-ب گزارش شده است.

با توجه به شکل ۴-ب میزان فرونشست در کمترین مقدار نزدیک صفر و در بیشترین مقدار حدود ۱ متر است و از سمت جنوب شهرستان قزوین به سمت شهرستان بویین‌زهرا میزان فرونشست‌ها رو به افزایش بوده و تا میانه شهرستان بویین‌زهرا به بیشینه خود می‌رسد و در ادامه در جنوب شهرستان بویین‌زهرا دوباره کاهش می‌یابد. این روند تغییرات در نقشه‌های فرونشست تصاویر راداری نیز مشاهده می‌شود. بیشترین فرونشست ۱۶ ساله فرونشست ۱۰۹/۲ سانتی‌متر در سال و ۶/۸ سانتی‌متر به صورت سالانه است. در تصاویر راداری میانگین فرونشست در کل آبخوان برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ به صورت بیشینه سالانه حدود ۷/۸- سانتی‌متر محاسبه شده که تناسب منطقی وجود دارد.

اندازه سلول نقشه فاکتورهای مؤثر ۳۰×۳۰ متر در نظر گرفته شد و سپس توسط GIS طبقه‌بندی شدند. نقشه‌های شیب، هدایت هیدرولیکی، افت سطح ایستابی آبخوان، ضخامت سنگ بستر، ضخامت لایه ریزدانه، توپوگرافی، شیب و هدایت هیدرولیکی با تعداد کلاس‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه‌بندی شدند و سپس بر اساس محاسبات بهینه (یعنی سرعت، زمان، حجم و غیره) ۱۰ کلاس برای طبقه‌بندی مناسب تشخیص داده شد. اما نقشه زمین‌شناسی به شش طبقه و نقشه کاربری اراضی به پنج طبقه باغ، کشاورزی آبی، منطقه شهری، کشاورزی دیم و زمین بایر تقسیم شد. محدوده کلاس‌های هشت فاکتور مؤثر در جدول ۲ برای منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل WoE و GIS آورده شده است. در شکل ۵ نقشه کلاسه‌بندی فاکتورهای مؤثر نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۴-ب میزان فرونشست در کمترین مقدار نزدیک صفر و در بیشترین مقدار حدود ۱ متر است و از سمت جنوب شهرستان قزوین به سمت شهرستان بویین‌زهرا میزان فرونشست‌ها رو به افزایش بوده و تا میانه شهرستان بویین‌زهرا به بیشینه خود می‌رسد و در ادامه در جنوب شهرستان بویین‌زهرا دوباره کاهش می‌یابد. این روند تغییرات در نقشه‌های فرونشست تصاویر راداری نیز مشاهده می‌شود. بیشترین فرونشست ۱۶ ساله فرونشست ۱۰۹/۲ سانتی‌متر در سال و ۶/۸ سانتی‌متر به صورت سالانه است. در تصاویر راداری میانگین فرونشست در کل آبخوان برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ به صورت بیشینه سالانه حدود ۷/۸- سانتی‌متر محاسبه شده که تناسب منطقی وجود دارد.

۳-۲- فاکتورهای مؤثر بر فرونشست دشت قزوین

برای تجزیه و تحلیل مکانی فرونشست، جمع‌آوری داده‌های فاکتورهای مؤثر بر آن مهم است. در مطالعات انجام شده فاکتورهای مؤثر بر وقوع و تشدید فرونشست در مناطق مختلف سنجیده شده است (Salehi Moteahd et al., 2019; Mohebbi Tafreshi et al., 2021; Liu et al., 2008; Sundell et al., 2019; Chen et al., 2014). با توجه به داده‌های موجود در دشت قزوین فاکتورهای: (۱) افت سطح ایستابی آبخوان در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸، (۲) زمین‌شناسی، (۳) عمق سنگ بستر، (۴) ضخامت لایه ریزدانه، (۵) هدایت

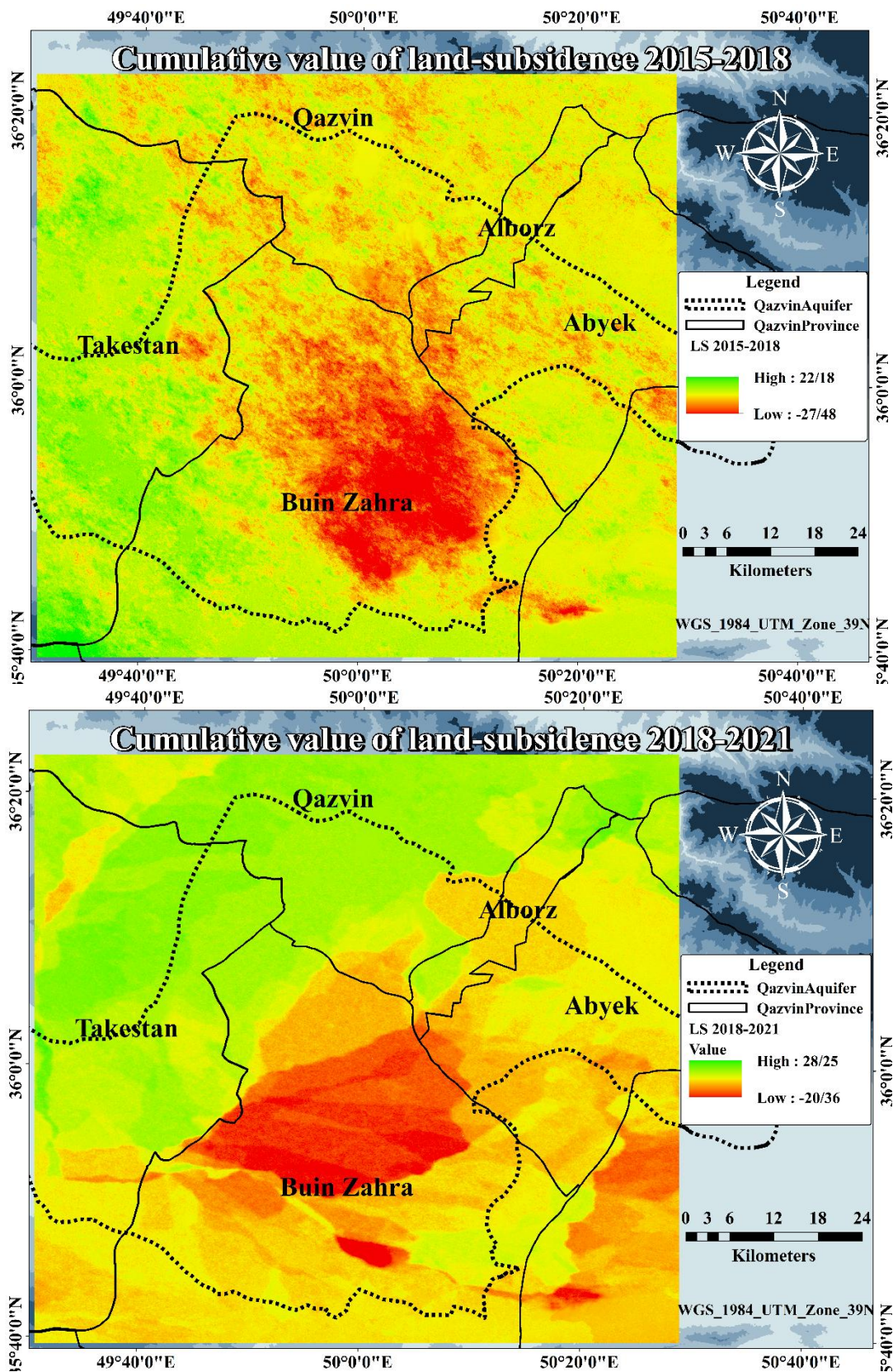
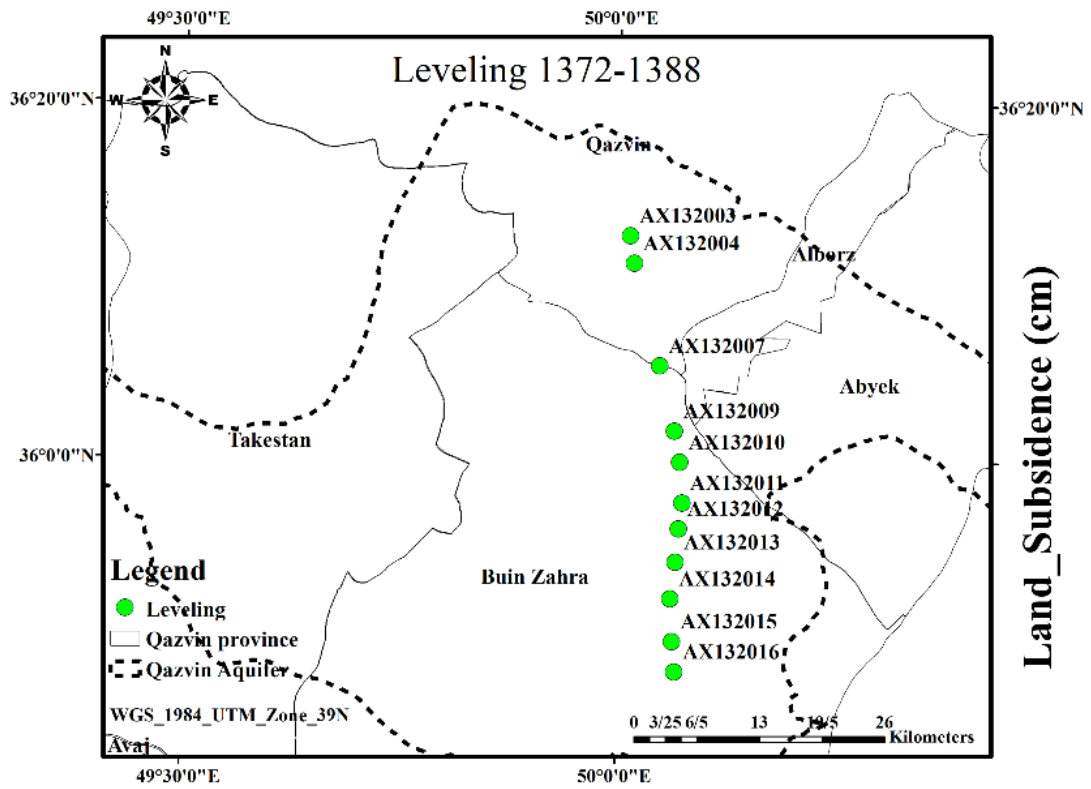
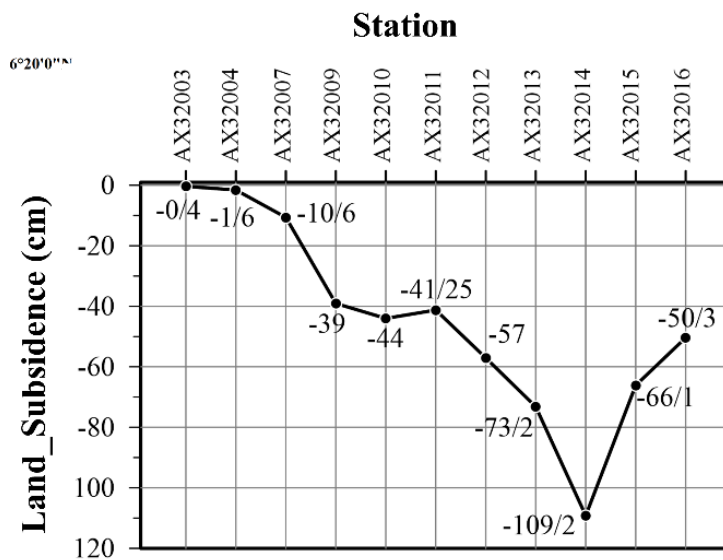


Fig. 3- The cumulative land subsidence map from a) 2015 to 2018 and b) 2018 to 2021  
 شکل ۳- مقدار تجمعی فرونشست زمین در سال الف) ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ و ب) ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱



a)



b)

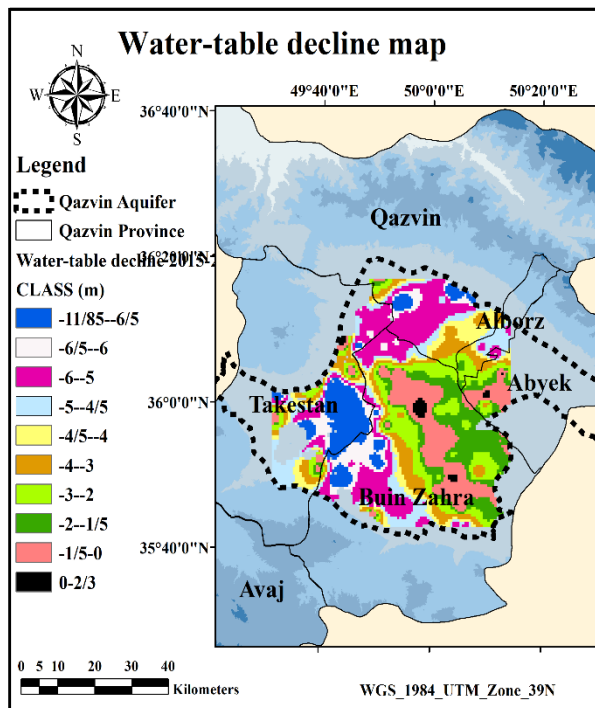
Fig. 4- Qazvin alignment data of 1993 and 2009 (1372 and 1388 Iranian Calendar) a) location of alignment stations and b) amount of alignment subsidence

شکل ۴- داده‌های ترازیبی قزوین سالهای ۱۳۷۲ و ۱۳۸۸ (الف) موقعیت ایستگاه‌های ترازیبی و (ب) مقدار فرونشست ترازیبی

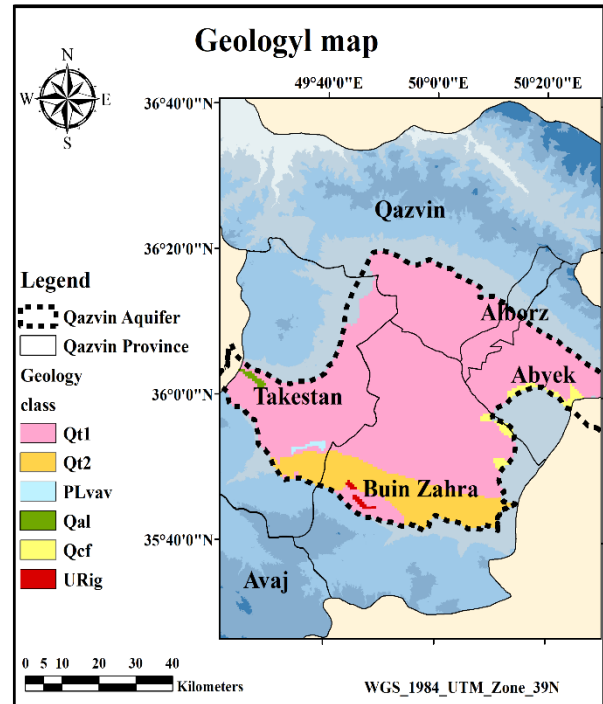
Table 2- Class range of all effective factor

جدول ۲- محدوده کلاس بندی فاکتورهای مؤثر

Class No.	Class Range							Land use	Geology*
	b0 (m)	K (m/day)	Slop (%)	DEM (m)	Bedrock depth (m)	h (m)			
1	0.5-38	0.25-0.75	0-0.4	1145-1170	54-132	(-11.85)- (-6.5)	Dry-farming	Qt1	
2	38-44	0.75-1.5	0.4-0.6	1170-1190	132-150	(-6.5)- (-6)	Garden	Qt2	
3	44-49	1.5-3	0.6-0.75	1190-1205	150-165	(-6)- (-5)	Bare-land	Plvav	
4	49-53	3-8	0.75-1	1205-1220	165-178	(-5)- (-4.5)	Urban	Qcf	
5	53-57.5	8-15	1-1.2	1220-1235	178-195	(-4.5)- (-4)	Agriculture	Urig	
6	57.5-62.5	15-25	1.2-1.4	1235-1250	195-200	(-4)- (-3)		Qal	
7	62.5-70	25-35	1.4-1.6	1250-1265	200-215	(-3)- (-2)			
8	70-78	35-50	1.6-1.85	1265-1285	215-240	(-2)- (-1.5)			
9	78-84	50-100	1.85-2.3	1285-1315	240-260	(-1.5)- 0			
10	84-184.3	100-537.5	2.3-7	1315-1513	260-300	0- 2.3			
*Geology description	Qt1	High level piedmont fan and valley terrace deposits						Quaternary	
	Qt2	Low level piedmont fan and valley terrace deposits						Quaternary	
	Plvav	Basaltic lava flows						Pliocene	
	Qcf	Clay flat						Quaternary	
	Urig	Red marl, gypseous marl, sandstone and conglomerate (Upper red Fm.)						Miocene	
	Qal	Stream channel, braided channel and flood plain deposits						Quaternary	

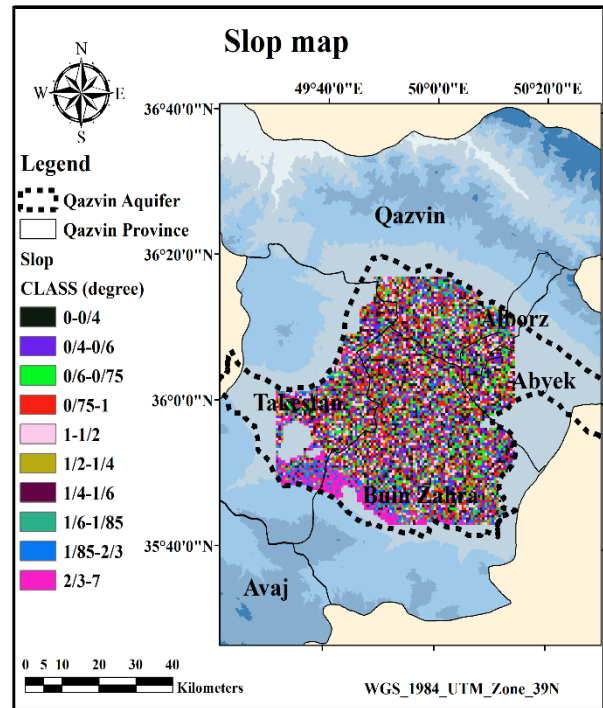
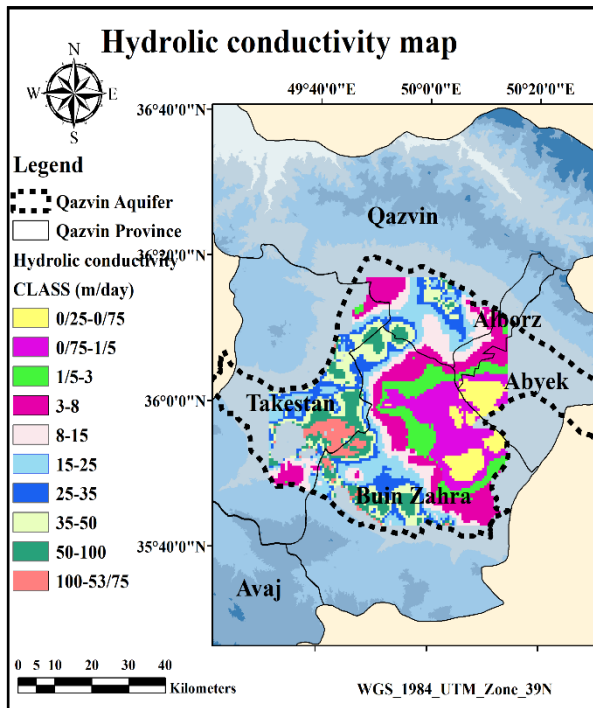


a)

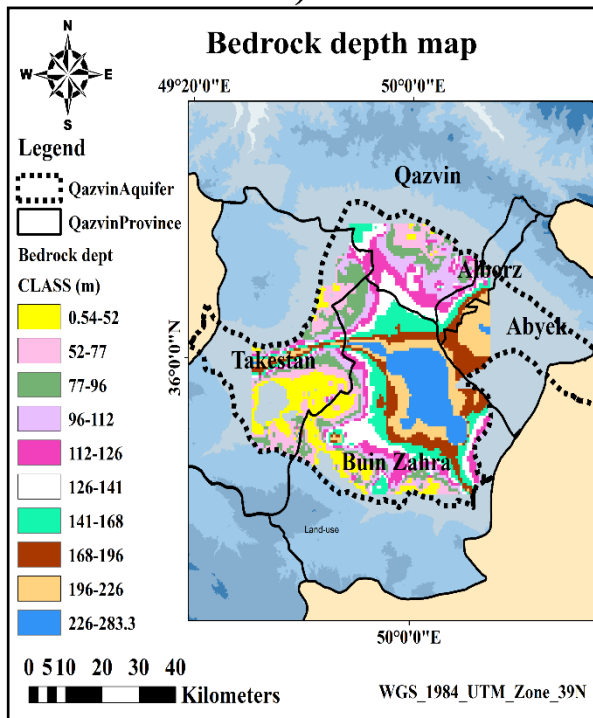


b)



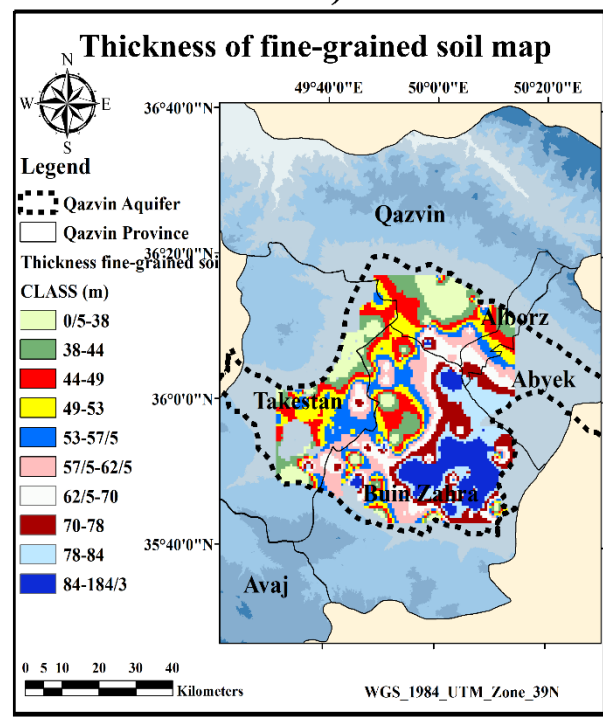


c)

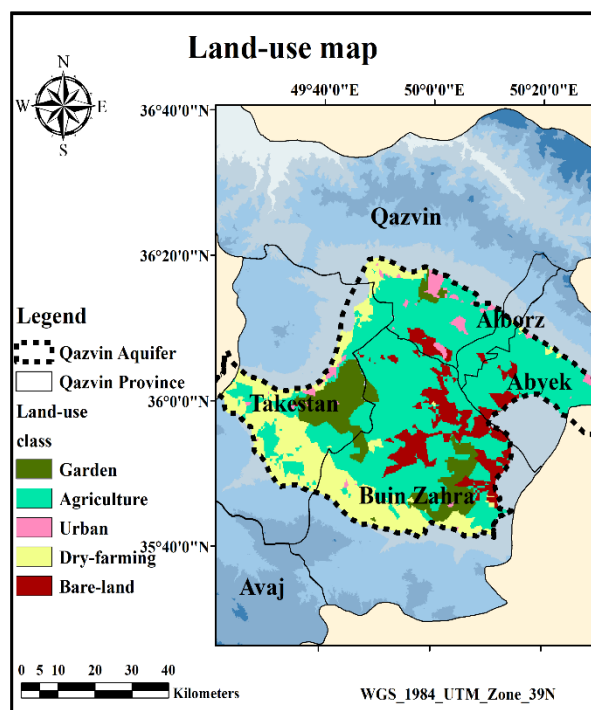
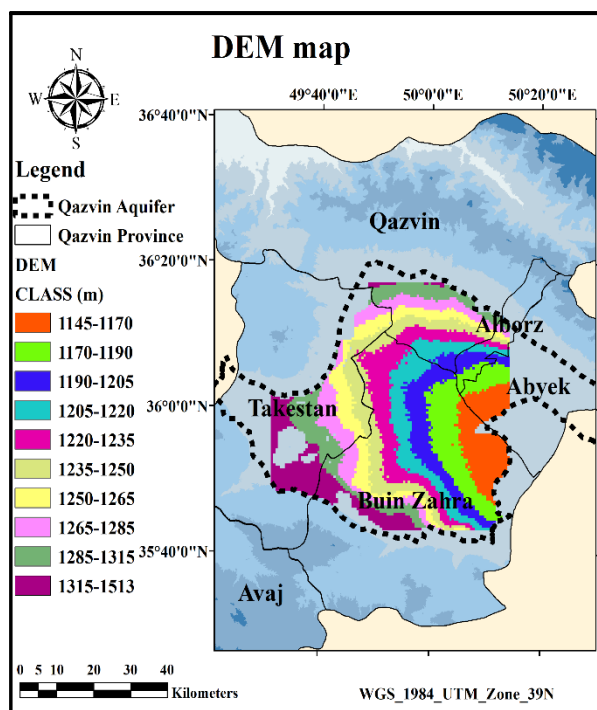


e)

d)



f)



g)

h)

Fig. 5- The classification of effective factors on land subsidence, a) Water-table decline 2015 to 2018, b) Geology, c) Hydraulic conductivity, d) Slope, e) Bedrock depth, f) Thickness of fine-grained soil, g) Topography (DEM), and h) Land use

شکل ۵- نقشه کلاسه‌بندی شده فاکتورهای مورد بررسی الف) افت سطح ایستابی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶، ب) زمین شناسی، ج) هدایت هیدرولیکی، د) شیب، ه) عمق سنگ بستر، و) ضخامت لایه‌های ریزدانه، ز) توپوگرافی و ح) کاربری اراضی

$$W^- = \log_e \frac{P\{B'D\}}{P\{B'D'\}} \quad (2)$$

که P احتمال است و در معادله،  $W^+$  و  $W^-$  به ترتیب وزن‌دهی ناحیه‌هایی که شواهد موجود است و ناحیه‌هایی که شواهد وجود ندارند است. در فضای کلی T، B تعداد سلول‌هایی است دارای شواهد است و  $B'$  تعداد سلول‌هایی است که شواهد وجود ندارد ( $B = T - B'$ ). D دامنه کار است و  $D' = T - D$  است. C مقدار تضاد<sup>۱</sup> است که نشان‌دهنده همبستگی مکانی بین مجموعه‌ی فاکتورها است و از رابطه زیر به دست می‌آید (Bonham- Carter and Agterberg, 1990):

$$C = W^+ - W^- \quad (3)$$

$S^2(W^+)$  و  $S^2(W^-)$  واریانس‌های  $W^+$  و  $W^-$  هستند که به ترتیب از رابطه (۴) و (۵) محاسبه می‌شود (Bonham- Carter and Agterberg, 1990):

$$S^2(W^+) = \frac{1}{P(B \cap D)} + \frac{1}{P(B \cap \bar{D})} \cong \frac{1}{P(B \cap D)} \quad (4)$$

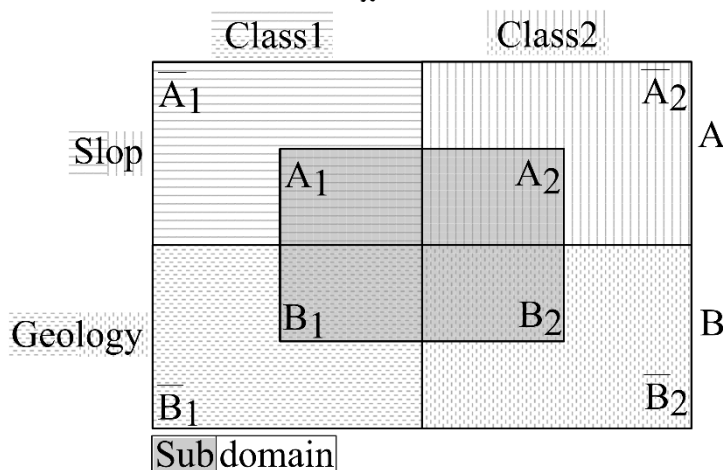
بر اساس نقشه کلاسه‌بندی فاکتورهای مؤثر، بیشترین هدایت هیدرولیکی و افت سطح ایستابی در غرب آبخوان و تاکستان است. عمق سنگ بستر و ضخامت ریزدانه در روندی برعکس بیشترین مقدار را در ناحیه شرق آبخوان و بویین زهرا نمایش داده‌اند. ارتفاع دشت از سمت شرق به غرب در حال افزایش است و نقشه شیب بسیار پراکنده است. همچنین، از نظر کاربری اراضی بیشترین سطح دشت متعلق به زمین کشاورزی و از نظر زمین شناسی به لایه‌های رسوبی است.

#### ۴-۲- روش وزن‌دهی شواهد و منحنی ROC در نقشه‌های مکانی

هسته اصلی روش وزن‌دهی شواهد، احتمال پسین<sup>۶</sup> در آمار بی‌زی<sup>۷</sup> است که توسط Bonham- Carter et al. (1994, 1989) استخراج شده است. بر این اساس رابطه وزن‌دهی شواهد به صورت زیر است (Bonham- Carter and Agterberg, 1990):

$$W^+ = \log_e \frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}} \quad (1)$$

است که نقشه فرونشست به دو بخش بدون فرونشست و دارای فرونشست کلاس‌بندی شد و نقشه هر فاکتور طبق شکل ۵ کلاس‌بندی شده است. سپس برای هر کلاس تعداد پیکسل‌هایی موجود در بخش فرونشست و بدون فرونشست به دست می‌آید. هر پیکسل مساحت واحد دارد. بر اساس این اعداد به دست آمده مطابق شکل ۷ وزن‌های شواهد محاسبه می‌شود. بایستی خاطر نشان کرد Sub به فضایی محدوده مورد مطالعه که فرونشست دارد اطلاق گردیده و domain بخشی از فضای مورد مطالعه است که بدون فرونشست است.



$$S^2(W^-) = \frac{1}{P(\bar{B} \cap D)} + \frac{1}{P(\bar{B} \cap \bar{D})} \cong \frac{1}{P(\bar{B} \cap D)} \quad (5)$$

$S(C)$  انحراف معیار تضاد است که از رابطه ۶ به دست می‌آید (Carter1-Bonham, 1994):

$$S(c) = \sqrt{S^2(W^+) + S^2(W^-)} \quad (6)$$

برای انجام روش وزن‌دهی شواهد در این پژوهش از ابزارهای Arc Toolbox در محیط GIS-ArcMap استفاده شده است و برای سهولت در Builder Model ساخته شده است. روند کار به این صورت

Factor	Class	*No. Sub	**No. domain	% Sub	% domain	W+	W-	C	$\sigma^+$	$\sigma^-$	S	C/S
Slop	1	A <sub>1</sub>	$\bar{A}_1$	C <sub>1</sub> (A <sub>1</sub> /A)	$\bar{C}_1$ ( $\bar{A}_1$ /A)	E <sub>1</sub> Ln(C <sub>1</sub> )	$\bar{E}_1$ Ln( $\bar{C}_1$ )	G <sub>1</sub> (E <sub>1</sub> - $\bar{E}_1$ )	I <sub>1</sub> (1/A <sub>1</sub> )	$\bar{I}_1$ (1/ $\bar{A}_1$ )	K <sub>1</sub> ( $\sqrt{J_1 - \bar{J}_1^2}$ )	G <sub>1</sub> /K <sub>1</sub>
	2	A <sub>2</sub>	$\bar{A}_2$	C <sub>2</sub> (A <sub>2</sub> /A)	$\bar{C}_2$ ( $\bar{A}_2$ /A)	E <sub>2</sub> Ln(C <sub>2</sub> )	$\bar{E}_2$ Ln( $\bar{C}_2$ )	G <sub>2</sub> (E <sub>2</sub> - $\bar{E}_2$ )	I <sub>2</sub> (1/A <sub>2</sub> )	$\bar{I}_2$ (1/ $\bar{A}_2$ )	K <sub>2</sub> ( $\sqrt{J_2 - \bar{J}_2^2}$ )	G <sub>2</sub> /K <sub>2</sub>
<b>Sum</b>		A (A <sub>1</sub> +A <sub>2</sub> )	$\bar{A}$ ( $\bar{A}_1 + \bar{A}_2$ )	1	1							
Geology	1	B <sub>1</sub>	$\bar{B}_1$	D <sub>1</sub> (B <sub>1</sub> /B)	$\bar{D}_1$ ( $\bar{B}_1$ /B)	F <sub>1</sub> Ln(D <sub>1</sub> )	$\bar{F}_1$ Ln( $\bar{D}_1$ )	H <sub>1</sub> (E <sub>1</sub> - $\bar{E}_1$ )	J <sub>1</sub> (1/B <sub>1</sub> )	$\bar{J}_1$ (1/ $\bar{B}_1$ )	L <sub>1</sub> ( $\sqrt{J_1 - \bar{J}_1^2}$ )	H <sub>1</sub> /L <sub>1</sub>
	2	B <sub>2</sub>	$\bar{B}_2$	D <sub>2</sub> (B <sub>2</sub> /B)	$\bar{D}_2$ ( $\bar{B}_2$ /B)	F <sub>2</sub> Ln(D <sub>2</sub> )	$\bar{F}_2$ Ln( $\bar{D}_2$ )	H <sub>2</sub> (E <sub>2</sub> - $\bar{E}_2$ )	J <sub>2</sub> (1/B <sub>2</sub> )	$\bar{J}_2$ (1/ $\bar{B}_2$ )	L <sub>2</sub> ( $\sqrt{J_2 - \bar{J}_2^2}$ )	H <sub>2</sub> /L <sub>2</sub>
<b>Sum</b>		B (B <sub>1</sub> +B <sub>2</sub> )	$\bar{B}$ ( $\bar{B}_1 + \bar{B}_2$ )	1	1							

\*With Land-Subsidence

\*\*Without Land-Subsidence

Fig. 6- WoE calculations

شکل ۶- محاسبات WoE

است. در یک مسئله دسته‌بندی دو دویی نتایج با دو برچسب مثبت<sup>۱۰</sup> (P) و منفی<sup>۱۱</sup> (N) مشخص می‌شوند. اگر در برچسب مثبت نتیجه واقعی مثبت<sup>۱۲</sup> (T) باشد، نتیجه مثبت صحیح<sup>۱۳</sup> (TP) نامیده می‌شود و اگر نتیجه واقعی منفی<sup>۱۴</sup> (F) باشد، این نتیجه به نام مثبت کاذب<sup>۱۵</sup> (FP) نام‌گذاری می‌شود. برای برچسب منفی اگر نتیجه واقعی نیز منفی بوده، منفی صحیح<sup>۱۶</sup> (TN) در غیر این صورت منفی کاذب<sup>۱۷</sup> (FN) شناخته می‌شود (Metz, 1978).

ارزیابی عملکرد نمودار ROC بر اساس ترسیم شاخص‌های نرخ مثبت صحیح یا حساسیت<sup>۱۸</sup> (SN) در مقابل نرخ مثبت کاذب<sup>۱۹</sup> (FPR) در محور  $y$  و  $x$  بدست می‌آید (جدول ۳). سطح زیر منحنی ROC<sup>۲۰</sup> (AUC) مقدار کمی تشخیص درست را نشان می‌دهد که برای عملکرد تصادفی ۰/۵ و برای عملکرد کامل ۱ است (Davis and Goadrich, 2006).

در نهایت در هر فاکتور، کلاس‌هایی که  $W^+$  و  $W^-$  به ترتیب مثبت و منفی هستند به عنوان همبستگی مکانی مثبت با فرونشست شناخته می‌شود. در غیر این صورت همبستگی مکانی منفی وجود دارد. در کلاس‌های که همبستگی مکانی مثبت دیده می‌شود، کلاسی که  $C$  بزرگتری دارد بیشترین همبستگی مکانی دارد و به عنوان کلاس منتخب هر فاکتور انتخاب می‌شود. وزن‌های کلاس منتخب به عنوان وزن‌های منتخب با علامت  $W^{+*}$  و  $W^{-*}$  نام‌گذاری می‌شوند. نقشه وزنی هر فاکتور (WM) به صورتی رسم می‌شود که به مساحت موجود در کلاس منتخب وزن  $W^{+*}$  و ما بقی مساحت وزن  $W^{-*}$  اختصاص می‌یابد. در نهایت، شاخص پتانسیل خطر فرونشست بر اساس وزن‌ها (WRM) از جمع نقشه وزنی همه فاکتورها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$WRM = \sum WM \quad (7)$$

نمودار ویژگی عملکرد گیرنده (ROC) یکی نمودار پیوسته برای بررسی و ارزیابی عملکرد دسته‌بندی‌های دو دویی<sup>۹</sup> با آستانه متغیر

Table 3- Calculation of SN and FPR index

جدول ۳- محاسبات شاخص SN و FPR

Explain	Equation	Index
Sensitivity, true positive value per real positive value	$TP/(TP+FN)$	SN
False Positive Rate, false positive value per real negative value	$FP/(TN+FP)$	FPR

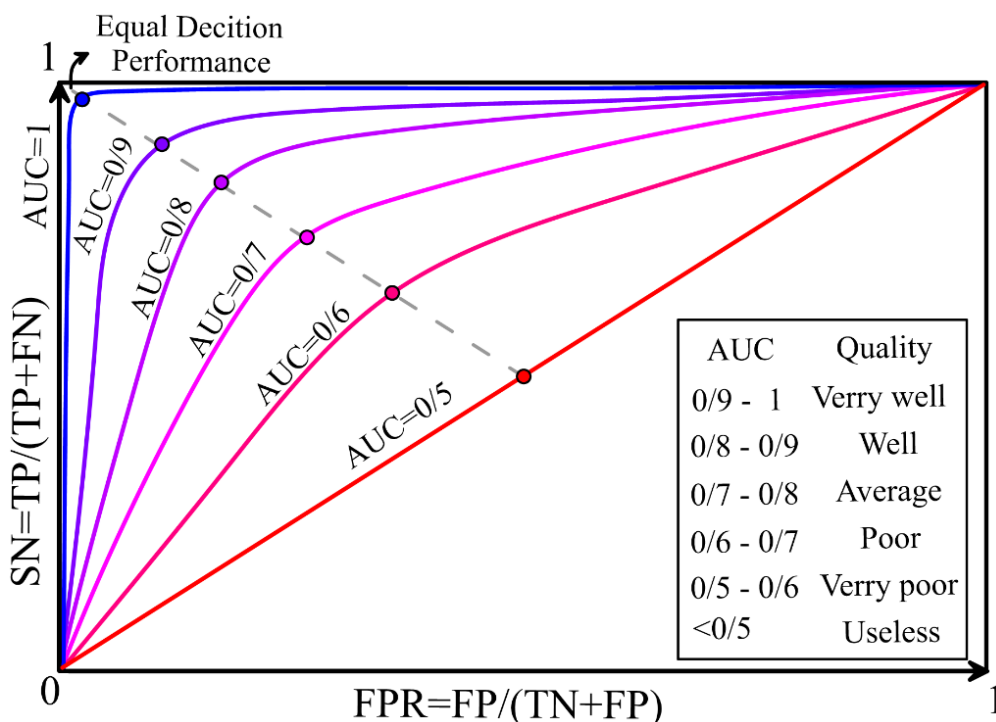


Fig. 7- ROC curve

شکل ۷- نمودار ROC

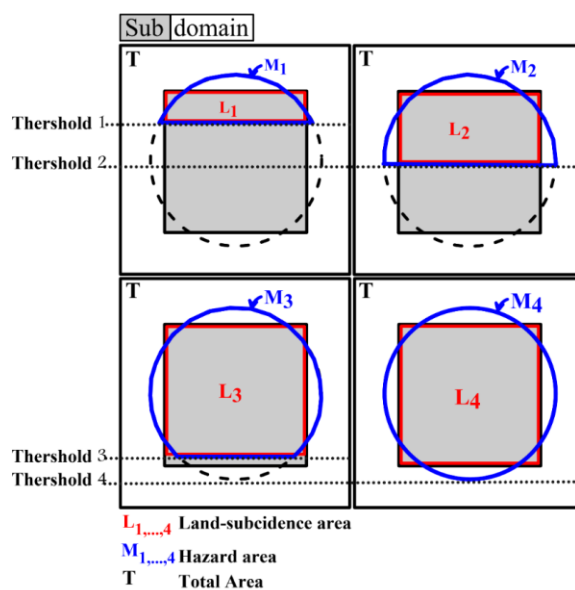
#### ۴- نتایج و بحث

روش وزن‌دهی شواهد برای تمامی فاکتورهای مؤثر و مقدار تجمعی فرونشست زمین سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ انجام شده است. محاسبات وزن‌دهی شواهد به صورت نمونه برای فاکتور DEM در جدول ۴ نمایش داده شده است.

طبق نتایج جدول ۴، DEM از نظر مکانی در کمترین ارتفاع‌ها ۱۱۴۵ تا ۱۲۳۵ با منطقه دارای فرونشست مرتبط است که از این میان کلاس ۱۱۴۵ تا ۱۱۷۰ با بیشترین C مرتبط‌ترین بوده و کلاس منتخب است. در نقشه افت سطح ایستایی خلاف تصور بیشترین فرونشست در بیشترین افت‌ها واقع نشده است در محدوده ۰ تا ۴ متر از افت بوده است. مرتبط‌ترین کلاس نیز ۱/۵- تا ۲- است.

با استفاده از شکل ۸ محاسبات نمودار ROC صورت گرفته است. روابط براساس قوانین جبر مجموعه‌ها است.

در این پژوهش فاکتورهای مؤثر بر فرونشست بر اساس مقدار تجمعی فرونشست زمین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ بر اساس روش WoE در محیط GIS وزن‌دهی می‌شوند و نقشه وزنی فاکتورها به دست می‌آید. سپس با استفاده از مقدار تجمعی فرونشست زمین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ و نمودار ROC در GIS صحت نقشه وزنی فاکتورهای مؤثر سنجیده می‌شود.



Threshold	TP	FP	TN	FN
1	$M_1 \cap L_1$	$M_1 - L_1$	$T - M_1 - (L_1 - M_1)$	$L_1 - M_1$
2	$M_2 \cap L_2$	$M_2 - L_2$	$T - M_2 - (L_2 - M_2)$	$L_2 - M_2$
3	$M_3 \cap L_3$	$M_3 - L_3$	$T - M_3 - (L_3 - M_3)$	$L_3 - M_3$
4	$M_4 \cap L_4$	$M_4 - L_4$	$T - M_4 - (L_4 - M_4)$	$L_4 - M_4$

Fig. 8- ROC calculation  
شکل ۸- محاسبات ROC

**Table 4- WoE Calculation of DEM**  
**جدول ۴- محاسبات وزن دهی شواهد برای فاکتور DEM**

%domain	%sub	sum	domain	sub	Class	factor		
1.31	13.42	26962.49	1383.40	25579.09	1145-1170	DEM (m)		
1.76	16.35	33017.25	1854.02	31163.22	1170-1190			
1.72	13.79	28098.68	1811.32	26287.37	1190-1205			
3.57	13.46	29422.63	3764.81	25657.82	1205-1220			
7.82	13.23	33448.90	8240.56	25208.34	1220-1235			
11.42	10.70	32434.37	12033.21	20401.15	1235-1250			
12.36	7.75	27804.92	13028.59	14776.32	1250-1265			
15.83	6.19	28473.09	16681.01	11792.08	1265-1285			
20.38	4.08	29245.74	21476.08	7769.66	1285-1315			
23.84	1.03	27091.94	25127.00	1964.93	1315-1513			
100.00	100.00	296000.00	105400.00	190600.00		sum		
C/S	S	w <sup>-</sup> σ	w <sup>+</sup> σ	C	W	W <sup>+</sup>	class	factor
351.86	0.0070	0.00001	0.00004	2.46	-0.13	2.32	*1145-1170	DEM (m)
369.94	0.0065	0.00001	0.00003	2.39	-0.16	2.23	1170-1190	
320.54	0.0069	0.00001	0.00004	2.21	-0.13	2.08	1190-1205	
205.38	0.0070	0.00001	0.00004	1.43	-0.11	1.33	1205-1220	
82.93	0.0071	0.00001	0.00004	0.59	-0.06	0.53	1220-1235	
-9.38	0.0077	0.00001	0.00005	-0.07	0.01	-0.06	1235-1250	
-58.44	0.0089	0.00001	0.00007	-0.52	0.05	-0.47	1250-1265	
-106.89	0.0098	0.00001	0.00008	-1.05	0.11	-0.94	1265-1285	
-151.40	0.0119	0.00001	0.00013	-1.80	0.19	-1.61	1285-1315	
-149.03	0.0228	0.00001	0.00051	-3.40	0.26	-3.14	1315-1513	

منتخب انتخاب شده‌اند. در نقشه کاربری اراضی محدوده کشاورزی، زمین باتلاقی، شهری و زمین بایر در محدوده فرونشست بودند و منطقه کشاورزی بیشترین وزن مثبت و بیشترین فرونشست را داشته است. در نقشه زمین شناسی نیز دو کلاس Qt1 و Qcf به عنوان رس تخت و کانسارهای سطح بالای فن پیمونت و تراس وادی مرتبط با محدوده فرونشست بودند و Qcf به عنوان کلاس منتخب انتخاب شد. نتایج کلاس‌های منتخب در روش وزن دهی شواهد در جدول ۵ خلاصه شده است.

هدایت هیدرولیکی نیز مانند افت سطح ایستایی، کمترین مقادیر ۰/۲۵ تا ۱۵ m/day دارای C مثبت بوده و بیشترین C مربوط به کلاس ۱/۵-۰/۷۵ است. در نقشه شیب کمترین مقادیر ۰ تا ۱/۴ درجه در محدوده فرونشست قرار داشته و کلاس ۰-۰/۴ بیشترین هماهنگی را با فرونشست داشته است. نقشه‌های ضخامت آبخوان و ضخامت لایه ریزدانه روندی یکسان داشتند و به ترتیب در بیشترین مقادیر خود ۶۲/۵ تا ۱۸۴/۳ و ۱۱۲ تا ۲۸۳/۳ بیشترین ارتباط را با محدوده فرونشست داشتند. همچنین کلاس ۱۸۴/۳-۸۴ و ۲۲۶-۲۸۳/۳ به ترتیب برای ضخامت آبخوان و ضخامت لایه ریزدانه به عنوان کلاس

**Table 5- Selected classes of WoE calculations**  
**جدول ۵- کلاس‌های منتخب محاسبات وزن دهی شواهد**

Factor	class	W <sup>+</sup>	W <sup>-</sup>	C	C/S
Fine grain soil b0 (m)	226-283/3	3/61	-0/16	3/77	560/62
Hydraulic conductivity k (m/day)	0/75-1/5	2/93	-0/18	3/12	497/37

DEM (m)	1145-1170	2/32	-0/13	2/46	351/86
Water table decline $\Delta h$ (2015-2018) (m)	-2--1/5	1/86	-0/17	2/03	325/38
Aquifer thickness b (m)	84-184/3	2/26	-0/14	2/41	357/01
Land use	Agriculture	0/62	-0/54	1/16	340/08
Geology	Qcf	1/23	-0/016	1/25	364/33
Sleep (degree)	0-0/4	0/44	-0/04	0/48	62/66

نشان داد عواملی چون ضخامت لایه ریزدانه بر شدت و ضعف فرونشست اثر بیشتری داشته است به طوری که گاهی سطح ایستابی افت شدید داشته (شرق آبخوان قزوین، تاکستان) ولی از آنجا که ضخامت لایه ریزدانه کم است فرونشست کمی دیده شده در صورتی که افت کمتر سطح ایستابی در منطقه شرق آبخوان با ضخامت لایه ریزدانه بیشتر، فرونشست شدیدتری را ایجاد کرده است.

بر اساس وزن‌های بدست آمده نقشه وزنی فاکتورهای مؤثر به دست می‌آید و با جمع نقشه‌های وزنی تمام فاکتورها، نقشه پتانسیل خطر فرونشست ترسیم می‌شود (شکل ۹).

مرتبطترین فاکتور با فرونشست آبخوان قزوین با بیشینه C برابر با ۲/۴۸ متعلق به محدوده لایه‌های ریزدانه است که بیشترین تطابق با محدوده فرونشست را داشته است. افت سطح ایستابی با  $C=۲/۰۳$  در رده چهارم و شیب با مقدار  $C=۰/۴۸$  در رده آخر قرار دارد. Galloway and Burbey (2011) و Modon (2013) افت سطح ایستابی را مسبب فرونشست نشان دادند و Becker, Chen et al. (2014) و (2015) و Salehi Moteahd et al. (2019) در مطالعات خود اشاره کردند علاوه بر کاهش آب زیرزمینی، سایر فاکتورهای آبخوان مانند فاکتورهای زمین‌شناسی نقش مهمی در الگوی و میزان فرونشست داشته است. با توجه به اینکه افت سطح ایستابی عامل پیدایش فرونشست در دشت قزوین شده، در این مطالعه روش وزن شواهد

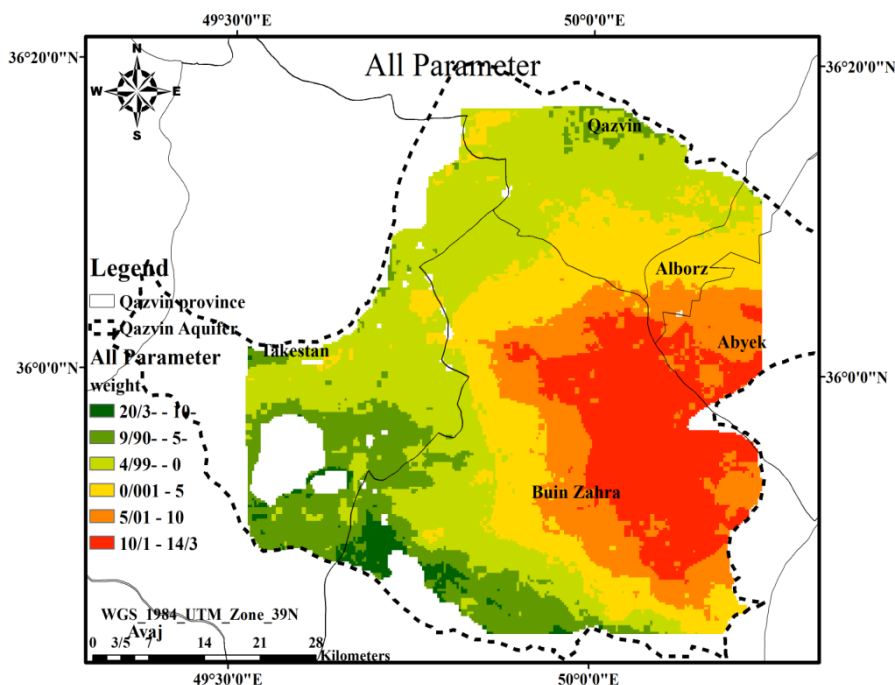


Fig. 9- The hazard maps with considering all effective factors

شکل ۹- نقشه پتانسیل خطر فرونشست با استفاده از وزن فاکتورهای مؤثر

نقشه پتانسیل خطر فرونشست با استفاده از فرونشست سالهای ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ با استفاده از منحنی ROC صحت‌سنجی می‌شود و در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

و به علت افت شدید سطح ایستابی در دهه‌های اخیر، پتانسیل وقوع فرونشست در آن وجود دارد. در این پژوهش برای محاسبه مقدار فرونشست به صورت سری زمانی و طولانی مدت از تصاویر راداری SENTINEL-1 استفاده شده است تا محدوده زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ را پوشش دهد. جهت بررسی علت پیدایش، شدت و ضعف فرونشست در مناطق مختلف، فاکتورهای شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، زمین شناسی، افت سطح ایستابی، هدایت هیدرولیکی، ضخامت لایه‌های ریزدانه و عمق سنگ بستر به عنوان عوامل مؤثر بر فرونشست بررسی شدند و میزان این ارتباط با روش وزن‌دهی شواهد وزن‌دهی شد. روش وزن‌دهی شواهد برای محیط GIS به صورت مکانی تعریف شد و محدوده مؤثر هر فاکتور بر پدیده فرونشست تعیین شد. با ترکیب محدوده مؤثر همه فاکتورها، نقشه پتانسیل خطر فرونشست ترسیم شد و نمودار ROC که در محیط GIS مکانی شده است درستی مدل‌ها صحت‌سنجی شد.

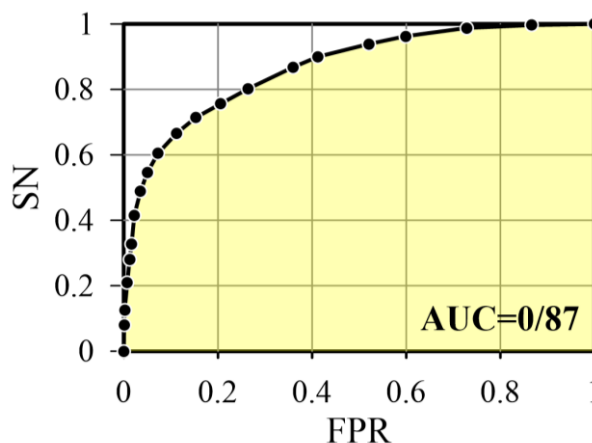


Fig. 10- The hazard maps ROC curve based on all factors

شکل ۱۰- منحنی ROC نقشه پتانسیل خطر فرونشست با در نظر گرفتن تمام فاکتورهای مؤثر

نتایج این پژوهش نشان دادند بیشترین مقادیر فرونشست در غرب و جنوب آبخوان قزوین پدید آمده است. روش وزن‌دهی شواهد نشان داد مقادیر هدایت هیدرولیکی، شیب، ارتفاع آبخوان و افت سطح ایستابی در کمترین دسته‌بندی خود با بیشترین فرونشست همخوانی داشته‌اند. در کاربری اراضی، منطقه کشاورزی و در زمین شناسی ناحیه رس تخت بیشترین ارتباط را با ناحیه فرونشست داشته است و در ضخامت لایه ریزدانه و ضخامت آبخوان بیشترین مقدار با بیشترین مقدار فرونشست مرتبط هستند. ضخامت لایه ریزدانه مرتبط‌ترین فاکتور به صورت مستقیم با فرونشست بدست آمد. در نهایت ترکیب همه فاکتورهای آبخوان به عنوان نقشه پتانسیل خطر فرونشست با پیش‌بینی خیلی خوب ارزیابی گردید. با توجه به نتایج این پژوهش دیده شد که سنجش از دور ابزار کارآمدی برای محاسبه مقدار و توزیع فرونشست با دقت مناسب است. همچنین، اثبات شد ترکیب روش وزن‌دهی شواهد و نمودار ROC، ارتباط بین فاکتورهای مؤثر آبخوان بر فرونشست را به خوبی ارزیابی می‌نماید و نقشه خطر پتانسیل فرونشست را می‌توان بر اساس آن ترسیم نمود. در بررسی فرونشست دریافت شد، شناخت فاکتورهای هیدرودینامیکی و زمین‌شناسی بسیار حائز اهمیت است و تنها در اثر افت سطح ایستابی فرونشست حادث نمی‌شود بلکه ضخامت لایه‌های ریزدانه آبخوان نیز بسیار تأثیرگذار است. به همین منظور پیشنهاد می‌شود برای کاهش مقدار فرونشست، اولویت کاهش برداشت آب‌های زیرزمینی با مناطقی باشد که ضخامت لایه ریزدانه‌تر آبخوان بیشتر است.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که نقشه پتانسیل خطر فرونشست حاصله از وزن‌دهی تمام فاکتورهای مؤثر تطابق خوبی با فرونشست سالهای ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ داشته است؛ زیرا مقدار AUC (سطح زیر نمودار) برابر با ۰/۸۷ به دست آمده است که مطابق شکل ۷ در محدوده ارزیابی خیلی خوب است. این بدان معنی است مناطقی که نقشه پتانسیل خطر فرونشست به عنوان خطرناک جهت فرونشست شناخته‌اند با منطقه‌های فرونشست بالا یکسان بوده و مناطقی که بی‌خطر بوده فرونشست دیده نشده است. بر این اساس نقشه پتانسیل خطر فرونشست فاکتورهای مؤثر کارایی بالایی در پیش‌بینی و اعلام خطر مکانی فرونشست‌های آبی دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

افت مستمر سطح ایستابی و بیلان منفی آبخوان‌ها در دهه‌های اخیر سبب وقوع پدیده فرونشست شده است و مخاطرات مالی، محیط زیستی و جانی شدید را به وجود آورده است. از این رو شناخت توزیع، مقدار و شدت فرونشست به صورت بزرگ مقیاس و سری زمانی با دقت مناسب جهت مدیریت و کاهش آن ضروری به نظر می‌رسد. اما تغییرات شدت و توزیع مقدار فرونشست بسته به فاکتورهای منطقه مانند فاکتورهای هیدرودینامیکی، زمین‌شناسی و غیره دارد که بایستی همواره ارتباط آنها در کنار محاسبات فرونشست دیده شود. برای این منظور از داده‌های دشت قزوین استفاده شد که به عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی، ابزارهای اندازه‌گیری از دیرباز در آن فعال هستند



## پی نوشتها

- 1- Land Subsidence
- 2- Persistent Scatterer Interferometry Techniques
- 3- Weight of Evidence
- 4- Receiver Operating Characteristic
- 5- Digital Elevation Model
- 6- Posterior Probability
- 7- Bayesian
- 8- Contrast
- 9- Binary Classification
- 10- Positive
- 11- Negative
- 12- True
- 13- True Positive
- 14- False
- 15- False Positive
- 16- True Negative
- 17- False Negative
- 18- Sensitivity
- 19- False Positive Rate
- 20- Area Under the Curve

## ۶- مراجع

- Abidin H Z, Andreas H, Gamal M, Gumilar I, Napitupulu M, Fukuda Y, Deguchi T, Maruyama Y, Riawan E (2010) Land subsidence characteristics of the Jakarta Basin (Indonesia) and its relation with groundwater extraction and sea level rise. Chapter in *Groundwater Response to Changing Climate*, CRC Press
- Abidin H Z, Djaja R, Darmawan D, and et al. (2001) Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its geodetic monitoring system. *Natural Hazards* 23:365–387
- Alipour S, Motgah M, Sharifi M, 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
- Amighpey M, Arabi S, Talebi A (2010) Studying Yazd subsidence using InSAR and precise leveling. *Geosciences Journal* 20(77):157-164 (In Persian)
- Andaroodi E, Sahrakaran B (2023) Vernacular Cultural Landscape of Qazvin's Traditional Gardens: A Review of Basic Concepts and Analysis of Elements and Features within the Scope of Built Environment. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 14(50):39-48. (In Persian)
- Babae S S, Mouavi Z, Roostaei M (2016) Time series analysis of SAR images using Small Baseline Subset (SBAS) and Persistent Scatterer (PS) approaches to determining subsidence rate of Qazvin Plain. *JGST* 5(4):95-111
- Becker M W (2006) Potential for satellite remote sensing of ground water. *Groundwater* 44(2):306-318
- Bonham-Carter G F (1994) *Geographic information systems for geoscientists*. Elsevier Science 398 pages
- Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F (1988) Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54(11):1585–1592
- Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F (1990) Application of a microcomputer-based geographic information system to mineral potential mapping. *Microcomputers in Geology* 2:49-74
- Chen Xx, Luo Zj, Zhou Sl (2014) Influences of soil hydraulic and mechanical parameters on land subsidence and ground fissures caused by groundwater exploitation. *Journal of Hydrodynamics* 26(1):155–164
- Cianflone G, Tolomei C, Brunori C A, Monna S, Dominici R (2018) Landslides and subsidence assessment in the Crati Valley (Southern Italy) Using InSAR Data. *Geosciences* 8:67
- Cigna F, Osmanoğlu B, Cabral-Cano E, Dixon T H, Ávila-Olivera J A, Garduño-Monroy V H, DeMets C, Wdowinski S (2012) Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment* 117:146-161
- Davis J, Goadrich M (2006) The relationship between Precision-Recall and ROC curves. In *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning (ICML '06)*, Association for Computing Machinery New York NY USA 233–240
- Fan F, Cui X, Yuan D, Wang J, Yang J, Wang S (2011) Weight of evidence method and its applications and development. *Procedia Environmental Sciences* 11:1412–1418
- Faryabi M A (2023) fuzzy logic approach for land subsidence susceptibility mapping: The use of hydrogeological data. *Environmental Earth Science* 82:209
- Galloway DL, Burbey TJ (2011) Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal* 19:1459–1486

- Gong W (2014) Long-term monitoring of geodynamic surface deformation using SAR interferometry. University of Alaska Fairbanks
- Goyal S K, Chaudhary B S, Singh O, et al. (2010) Variability analysis of groundwater levels- AGIS-based case study. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 38:355-364
- Haghighatmehr 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)
- Janbaz Fotamy M, Kholghi M, Abdeh Kolahchi A, Roostaei M (2020) Land subsidence assessment due to groundwater exploration by using differential radar interferometry technique, case study: Qazvin Province. *Iran-Water Resources Research* 16(3):133-147. (In Persian)
- Lien T, Cheng C, Hwang C, Crossley D (2014) Assessing active faulting by hydrogeological modeling and superconducting gravimetry: A case study for Hsinchu Fault, Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Soil Earth* 1-17
- Mahmoudpour M, Khomehchiyan M, Nikudel M R, Ghassemi M R (2016) Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran. *Engineering Geology* Volume 201:6-28
- Metz CE (1978) Basic principles of ROC analysis. *Seminars in Nuclear Medicine* 8(4):2832-98
- Mohammady M, Pourghasemi H R, Amiri M (2019) Assessment of land subsidence susceptibility in Semnan Plain (Iran): A comparison of support vector machine and weights of evidence data mining algorithms. *Natural Hazards* 99:951-971
- Mohebbi Tafreshi G, Nakhaei M, Lak R (2021) Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *Geo Journal* 86:1203-1223
- Modoni G, Darini G, Spacagna RL, Saroli M, Russo G, Croce P (2013) Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering Geology* 167:59-71
- Nameghi H, Hosseini S M, Sharifi M B (2013) An analytical procedure for estimating land subsidence parameters using field data and InSAR images in Neyshabur plain. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology* 6(1&2):33-50 (In Persian)
- Oh H, Lee S (2010) Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model. *Engineering Geology* 115:36-48
- Salehi Moteahd F, Hafezi Moghaddas N, Lashkaripour G R, Dehghani M (2019) Geological parameters affected land subsidence in Mashhad plain, north-east of Iran. *Environmental Earth Science* 78:405
- Liu Y, Helm D C (2008) Inverse procedure for calibrating parameters that control land subsidence caused by subsurface fluid withdrawal. *Water Resources Research* 44:W07423
- Sekkeravani M A, Bazrafshan O, Pourghasemi H R, and et al. (2022) Spatial modeling of land subsidence using machine learning models and statistical methods. *Environmental Science and Pollution Research* 29:28866-28883
- Shahi H, Kamkar Rouhani A (2014) A GIS-based weights-of-evidence model for mineral potential mapping of hydrothermal gold deposits in Torbat-e-Heydarieh area. *Journal of Mining and Environment* 5(2):79-89
- 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
- Sundell J, Haaf E, Norberg T, Alén C, Karlsson M, Rosén L (2019) Risk mapping of groundwater drawdown-induced land subsidence in heterogeneous soils on large areas. *Risk Analysis* 39:105-124
- Thiart C, Bonham-Carter G F, Agterberg F P (2003) Conditional independence in weights of evidence: application of an improved test. *IAMG, International Association for Mathematical Geology*, Portsmouth, UK.
- 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