

## Land Subsidence Hazard Assessment using Weights-of-Evidence model (Case Study: Karaj City)

Somayeh Taheri<sup>1\*</sup>  | Hasan Ahmadi<sup>2</sup> | Jamal Ghodousi<sup>3</sup> | Sadat Feiznia<sup>2</sup> |  
Shahram Khalighi<sup>2</sup> | Mohammad Hossein Ramesht<sup>4</sup>

1. Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

E-mail: [stahery@ut.ac.ir](mailto:stahery@ut.ac.ir)

2. Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources,  
University of Tehran, Karaj, Iran

3. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran

4. Faculty of Geographical Sciences and Planning, Isfahan University, Isfahan, Iran

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received: 13 Dec. 2018  
Revised: 13 Sep. 2019  
Accepted: 13 Nov. 2019  
Published online: 22 Oct. 2024

**Keywords:**  
*Geographic information system,  
Karaj,  
Alluvium,  
Permeability.*

### Abstract

Subsidence in urban areas poses significant risks to infrastructure, including buildings, roads, railways, pipelines, sewage systems, and wells. Therefore, assessing its potential is crucial. This study models the subsidence risk in Karaj using Geographic Information Systems (GIS) and the Weight of Evidence (WoE) model. To achieve this, we created maps of factors influencing subsidence, such as slope, alluvial thickness, groundwater fluctuations, aquifer layering, particle size, and permeability. These maps were then compared with recorded subsidence data to determine the weight of each factor's influence. By integrating the effects of these factors, a Subsidence Index (SI) map was generated and categorized using the Success Rate Curve (SRC), identifying five sensitivity zones ranging from very sensitive to very low sensitivity. The effectiveness of the WoE model was evaluated, revealing that the subsidence sensitivity prediction map covers 93.64% of actual occurrences. Results indicated that aquifer layering positively influences subsidence development, with the highest impact arising from alluvial deposits characterized by good permeability and fine particles. This factor, with a weight of 3.72, demonstrates significant influence among all evaluated parameters. In terms of thickness, the most significant subsidence occurred in alluvial deposits exceeding 200 meters. Areas experiencing groundwater level declines of over half a meter annually markedly contributed to subsidence. Additionally, slopes of less than two degrees were identified as the most susceptible to subsidence. Thus, while many areas in Karaj are relatively safe, the threat is notably higher in the southern and southwestern parts, requiring special attention in urban management.

**Cite this article:** Taheri, S., Ahmadi, H., Ghodousi, J., Feiznia, S., Khalighi, S., Ramesht, M.H. (2024). Land Subsidence Hazard Assessment using Weights-of-Evidence model (Case Study: Karaj City). *Journal of Range & Watershed Management*, 77 (3), 389-402. DOI: <https://doi.org/10.22059/jrwm.2024.22623.0>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

## ارزیابی قابلیت مخاطره‌ی فرونشست زمین به روش Weights-of-Evidence (مطالعه‌ی موردی شهر کرج)

سمیه طاهری<sup>۱\*</sup> | حسن احمدی<sup>۲</sup> | جمال قدوسی<sup>۳</sup> | سادات فیض‌نیا<sup>۲</sup> | شهرام خلیقی<sup>۲</sup> | محمدحسین رامشت<sup>۴</sup>

۱. گروه مهندسی عمران-محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

۴. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

رایانامه: [stahery@ut.ac.ir](mailto:stahery@ut.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

#### کلیدواژه‌ها:

سیستم اطلاعات جغرافیایی،

کرج،

آبرفت،

نفوذپذیری.

فرونشست زمین در مناطق شهری به سازه‌ها، جاده‌ها، خطوط آهن، لوله‌ها، سیستم‌های فاضلاب و چاه‌ها آسیب وارد می‌کند و تعیین پتانسیل آن اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش استعداد فرونشست زمین در شهر کرج به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل وزن نشانگر (WoE) مدل‌سازی شده است. بدین‌منظور نقشه‌ی فاکتورهای موثر بر فرونشست شامل شیب، ضخامت آبرفت، تغییرات سطح سفره‌ی آب‌زیرزمینی، لایه‌ای بودن آبخوان و اندازه‌ی ذرات و نفوذپذیری تهیه و با مقادیر ثبت‌شده‌ی فرونشست مقایسه‌شده و وزن تأثیر هر یک تعیین گردید. درنهایت از تلفیق اثر این فاکتورها، نقشه‌ی شاخص پتانسیل مخاطره‌ی فرونشست (SI) تعیین شده و به کمک منحنی نرخ موفقیت (SRC) پهنه‌بندی شد. برای این اساس، پنج پهنه از نظر حساسیت به فرونشست از بسیار حساس تا حساسیت بسیار کم مشخص گردید. به‌منظور تعیین کارایی مدل WoE به کمک منحنی SRC مشخص شد نقشه‌ی پیش‌بینی حساسیت به فرونشست، ۶۴/۹۳ درصد از واقعیت زمینی را پوشش داده است. نتایج نشان داد، لایه‌ای بودن آبخوان، تأثیر مثبتی در ایجاد فرونشست دارد. بیشترین تأثیر نفوذپذیری بر فرونشست مربوط به آبرفت‌هایی با نفوذپذیری به‌نسبت خوب و دارای مقداری ذرات ریزدانه می‌باشد که با وزن نهایی ۷۲/۳، در بین طبقات مختلف تمامی پارامترها، بیشترین وزن را دارد و به‌نظر می‌رسد یکی از شرط‌های لازم برای رخداد فرونشست است. از لحاظ ضخامت آبرفت، بیشترین میزان فرونشست در آبرفت‌های ضخیم (بیش از ۲۰۰ متر) اتفاق افتاده است. به‌علاوه، مناطقی که بیش از نیم متر در سال افت متوسط آب زیرزمینی داشته‌اند نیز موثرترین طبقه‌ی نوسانات سطح سفره بر پدیده‌ی فرونشست بوده‌اند. همچنین شیب‌های کمتر از دو درجه، مستعدترین شرایط شیب برای بروز فرونشست می‌باشد. بنابر نتایج، بسیاری از مناطق کرج در برابر مخاطره‌ی فرونشست به‌نسبت ایمن هستند ولی استعداد این مخاطره در جنوب و جنوب‌غرب شهر بالا و نیازمند توجه ویژه در مدیریت شهری است.

**استناد:** طاهری، سمیه؛ احمدی، حسن؛ قدوسی، جمال؛ فیض‌نیا، سادات؛ خلیقی، شهرام؛ رامشت، محمدحسین (۱۴۰۳). ارزیابی قابلیت مخاطره‌ی فرونشست زمین به روش Weights-of-Evidence (مطالعه‌ی موردی شهر کرج). نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۷(۳)، ۳۸۹-۴۰۲.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jrwm.2024.22623.0>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

## ۱. مقدمه

فرونشست زمین به فرورفتگی ناگهانی یا نشست تدریجی سطح زمین گفته می‌شود که در اثر جابجایی ذرات تشکیل‌دهنده‌ی پوسته‌ی زمین صورت می‌گیرد (Burbey 2010). به طور معمول این اصطلاح به حرکات قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار اندک افقی همراه باشد، گفته می‌شود. در مناطق مختلف، علت‌های متفاوتی ممکن است سبب بروز فرونشست شود که از آن جمله می‌توان اشاره کرد به فشردن رسوبات نزدیک به سطح زمین و فشردن آن‌ها، فشردگی طبیعی خاک، فشردن مخازن زیرزمینی مواد زیرزمینی، آب‌دار شدن رسوبات نزدیک به سطح زمین و فشردن آن‌ها، فشردگی طبیعی خاک، فشردن مخازن زیرزمینی مواد نفتی، تکنونیک و حرکات صفحات زمین، چرخه‌ی انجماد و ذوب مجدد افق‌های خاک و فرایندهای دیگری که بارها در سرتاسر کره‌ی زمین ارزیابی و بررسی شده‌اند (National Research Council 1991). فرونشست به‌ویژه در مناطق شهری ممکن است به ساختمان‌ها و سازه‌های مهندسی، جاده‌ها، خطوط آهن، لوله‌ها، سیستم‌های فاضلاب و چاه‌ها آسیب وارد سازد (Poland et al., 1984). خسارت به چاه‌ها در منطقه‌های فرونشست روستایی و شهری متداول بوده و موجب خرابی چاه‌ها و ایجاد پدیده "رشد چاه" یا "دست درآوردن چاه" می‌شود. اگر فرونشست در اثر تغییرات سطح سفره‌ی آب زیرزمینی ایجاد شود، ممکن است با افزایش سیلاب‌های رودخانه‌ای و ساحلی، تداخل جبهه‌های آب شور و شیرین و دوباره فعال شدن گسل‌های سطحی و ایجاد راه‌های جدید عبور رواناب سطحی و در نتیجه آلوده شدن آبخوان‌ها نیز همراه باشد (Hoffman et al., 2003). همچنین این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در وضعیت هیدروژئولوژیکی منطقه از قبیل جهت و سرعت جریان زیرزمینی، بیابان آب زیرزمینی و غیره نتیجه‌های ناهنجار بیشتری در پی داشته باشد. فرونشست می‌تواند به تخریب سیستم‌های آبیاری و خاک‌های حاصلخیز کشاورزی (با پایین آوردن تخلخل آنها) منجر شود. پدیده‌ی فرونشست در مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت، وجود ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی (خیابان‌ها، پل‌ها، راه‌آهن، خطوط گاز و...) آسیب‌رسان‌تر می‌باشد. از میان همه‌ی علل شناخته شده، به‌نظر می‌رسد معمول‌ترین دلیل فرونشست، فشار انسان‌ها بر منابع زیرزمینی آب باشد. در مناطقی که برداشت آب زیرزمینی زیاد صورت می‌گیرد و سطح سفره افت می‌کند و یا بنابر دلایل متعددی سطح سفره بالا می‌رود و رسوبات اشباع می‌شوند، آبخوان فشرده می‌شود و رسوباتی که مستحکم نشده‌اند، در نخستین مراحل دیاژنز، فشرده شده و ایجاد فرونشست می‌کنند. فرونشست زمانی به‌عنوان یک مخاطره در نظر گرفته می‌شود که میزان تنش وارد شده بر آبخوان، از مقدار نیرویی که برای استحکام رسوبات نیاز است بیشتر باشد. در این صورت جابجایی ایجاد شده پایدار و غیرالاستیک می‌باشد (Riley 1969, Poland et al. 1988, Heywood 1997).

در اکثر منابع موجود و تحقیقات انجام شده در دنیا، فرونشست ناشی از برداشت از معادن زغال‌سنگ (Coal Industry Promotion Board 1999, Gutiérrez et al., 2010, Hyun joo et al., 2010, Phien-wej et al., 2006) و نیز فرونشست حاصل از تونل‌های احداث شده (Tianliang et al., 2010) بررسی شده‌اند و این در حالی است که با توجه به آبرفتی بودن منطقه‌ی مورد مطالعه به‌نظر می‌رسد پارامترهای مرتبط با آبخوان بیشترین تأثیر را در فرونشست کرج داشته باشند. نخستین کسی که تغییرات سطح سیال و خصوصیات مرتبط با سفره را با فرونشست زمین ارتباط داد، دکتر مینزر بود (Meinzer 1928). وی با مطالعه‌ی میدان نفتی گوس کریک<sup>۱</sup> در ایالت داکوتای<sup>۲</sup> آمریکا، نظر داد که افت سطح ایستابی یکی از بارزترین عوامل فرونشست زمین می‌باشد. پس از وی نیز تحقیقات مختلفی بر روی فرونشست و ارتباط آن با مشخصات آبخوان صورت گرفت (Buffardi et al., 2023; Aranda-Gómez et al., 2010; Audiguier et al., 2010; Ochoa-González et al., 2010; Calderhead et al., 2010; 2010; Yazdani et al., 2010; Vaezinejad et al., 2010). این مطالعات از پردازش متغیرهای آماری برای بررسی عوامل موثر بر فرونشست استفاده شده است. مسأله‌ی فرونشست به‌ویژه در مناطق شهری مسأله‌ی حائز اهمیتی است و به دلیل پیوند عمیق این مخاطره با مسائل اقتصادی، مطالعات روبه گسترشی نیز در مناطق شهری صورت گرفته است. سرکا در سال ۲۰۱۰ میلادی با کمک اطلاعات موجود، کارتوگرافی صحرائی، توجه به مشخصه‌های فیزیکی و با

<sup>1</sup> Goose Creek

<sup>2</sup> Dakota

استفاده از رادارهای نفوذ کننده در زمین (GPR<sup>۱</sup>)، فرونشست در مکزیکوسیتی را بررسی کرده است (Cerca et al. 2010). در کشور ما نیز در چند سال گذشته که فرونشست رفسنجان، جنوب تهران، دشت شهریار و برخی مناطق دیگر به حد بحرانی رسیده است، مسئولین امر به پشتیبانی تحقیقات و اختصاص اعتبارات لازم روی آورده‌اند. در این راستا، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور مسؤلیت بررسی این پدیده و شناسایی عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن را به سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور سپرده است. براین اساس معاونت زمین‌شناسی این سازمان اقدام به بررسی مقدار کمی فرونشست اتفاق افتاده در تمامی دشت‌های کشور نموده و در برخی دشت‌ها نیز سیستم‌های پایش ویژه‌ای را در چاه‌های مخصوص نصب کرده تا در هر ۵۰ سانتی‌متر عمق زمین، گراف تغییرات زمانی جابجایی زمین را به‌دست آورد. این سازمان برای تهیه نقشه‌های فرونشست، از بررسی داده‌های InSAR با همکاری محققین دانشگاه‌های کمبریج و آکسفورد و نیز مطالعات GIS استفاده کرده و نقشه‌های واقعیت‌زمینی بیش از ۲۰۰ دشت کشور را تهیه کرده است. علاوه بر این، مطالعات دانشگاهی دیگری نیز بر روی پدیده‌ی فرونشست زمین انجام شده است. از جمله پاکروان در سال ۱۳۸۴ با مطالعه روی فرونشست مناطق جنوبی و جنوب غربی تهران، تغییرات سطح سفره در آبخوان را عامل فرونشست در این مناطق معرفی کرده است (Pakravan 2005). در مطالعه‌ی حاضر، تلاش شده است که استعداد بروز فرونشست در بخش‌های مختلف شهر کرج ارزیابی و پهنه‌بندی گردد.

## ۲. مواد و روش‌ها

در منطقه‌ی مورد مطالعه، به منظور بررسی پتانسیل مخاطره‌ی فرونشست، از یکی از مدل‌های وزن‌دهی به پارامترها بر اساس واقعیت زمینی استفاده شد. در این روش که  $WoE^2$  نام دارد، فاکتورهایی که احتمال می‌رفت در منطقه‌ی مورد مطالعه، تأثیر مهم‌تر و قابل‌توجهی بر پدیده‌ی فرونشست داشته باشند بررسی شده و از مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر اتفاق افتاده و ثبت‌شده‌ی فرونشست، وزن تأثیرشان بر این مخاطره تعیین گردید و در نهایت از تلفیق اثر همه‌ی این فاکتورها، نقشه‌ی پتانسیل مخاطره‌ی فرونشست تعیین شد. در ادامه، مراحل انجام کار تشریح می‌شود.

### ۲-۱. منطقه‌ی تحقیق

این پژوهش در یکی از شهرهای شهرستان کرج و مرکز استان تازه تأسیس البرز انجام شده است. وسعت قانونی این کلان‌شهر طبق بررسی‌های سال ۱۳۸۶ به ۱۷۴۵۸ هکتار می‌رسد. کرج در ۳۵ کیلومتری غرب تهران و در کوه‌پایه‌ی البرز مرکزی واقع است و شیب عمومی آن از شمال به جنوب است. این شهر از شمال و شمال شرقی به ارتفاعات البرز، از جنوب به شهر اندیشه و ملارد، از غرب به کمال‌شهر و مشکین‌دشت و محمدشهر و از شرق به تهران و گرم‌دره محدود است. شهر کرج در سیستم مختصات جغرافیایی، بین عرض‌های  $۳۵^{\circ} ۴۱'$  و  $۳۵^{\circ} ۵۳'$  شمالی و طول جغرافیایی  $۵۰^{\circ} ۵۰'$  و  $۵۱^{\circ} ۰۲'$  شرقی قرار دارد.

### ۲-۲. مدل $WoE$

$WoE$ ، از یک مدل احتمال Bayesian استفاده می‌کند و برای نخستین بار به‌منظور بررسی پتانسیل مواد معدنی در معادن مورد استفاده قرار گرفت (Agterberg et al. 1993, Bonham-Carter et al. 1988, Bonham-Carter et al. 1989, Bonham-Carter et al. 1994, Emmanuel et al. 2000). از آن پس، این مدل بارها و بارها در گوشه و کنار جهان آزموده شده و امروزه برای ارزیابی مخاطرات و بررسی پتانسیل مخاطرات طبیعی کاربرد رو به گسترش و قابل‌توجهی یافته و نتایج بسیار خوبی ارائه داده است (Zare 1389, Hyun joo 2010, Mathew et al. 2007, Kumar Dahal et al., 2007).  $WoE$ ، روشی ساده است که به راحتی قابل استفاده بوده و در زمان به‌نسبت کوتاهی

<sup>1</sup> Ground Penetrating Radar

<sup>2</sup> Weights of Evidence

قابل اجرا می‌باشد (Soeters et al. 1996, Suzen et al. 2004). به علاوه این مدل را می‌توان به کمک اغلب نرم‌افزارهای GIS اجرا نمود. مفاهیم پایه‌ی این مدل به خوبی در منابع موجود تشریح شده است (Bonham-Carter et al. 1988, Bonham-Carter et al. 1989, Bonham-Carter et al. 1994). این مدل، هر کدام از فاکتورهای پیش‌بینی کننده‌ی مخاطره را با وجود یا عدم وجود آن مخاطره در واقعیت زمینی مقایسه کرده و از این طریق وزن هر فاکتور را براساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌کند. در اینجا:

$$W_F = W_i^+ - W_i^- \quad \text{رابطه ۱}$$

$$W_i^+ = \ln \frac{P\{B|S\}}{P\{\bar{B}|S\}} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$W_i^- = \ln \frac{P\{\bar{B}|S\}}{P\{B|S\}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$P$  به معنی احتمال؛

$B$  = وجود پارامتر موثر در فرونشست زمین؛

$\bar{B}$  = عدم وجود پارامتر موثر در فرونشست زمین؛

$S$  = وجود رخداد فرونشست مشاهداتی و

$\bar{S}$  = عدم وجود رخداد فرونشست مشاهداتی می‌باشد.

وزن مثبت، نشان می‌دهد که پارامتر متغیر مورد نظر در محلی که فرونشست رخ داده است وجود دارد. هر چقدر این مقدار بزرگتر باشد مشخص می‌شود که ارتباط و همبستگی بالاتری بین پارامتر در نظر گرفته شده و واقعیت زمینی موجود است. وزن منفی نشان می‌دهد که واقعیت زمینی و پارامتر مورد نظر تا چه میزان ارتباط منفی با هم دارند. به عبارت دیگر مشخص می‌کند که واقعیت زمینی تا چه میزان با پارامترهایی بجز پارامتر مورد نظر همبستگی دارد. بنابراین آنچه حائز اهمیت می‌باشد، تفاوت بین دو وزن + و - یعنی  $W_i^+$  و  $W_i^-$  است که تضاد یا کنتراست ( $W_F$  یا  $C$ ) را نشان می‌دهد. هر چه میزان کنتراست بالاتر باشد نشان می‌دهد که ارتباط مکانی بین واقعیت زمینی و پارامتر پیش‌بینی کننده‌ی مخاطره بیشتر است. برای ارزیابی دقیق این که هر پارامتر ژئومورفولوژیکی چه میزان در ایجاد فرونشست تأثیر دارد بایستی از ابزارهای GIS استفاده شود. در تحقیق حاضر، این کار به کمک نرم‌افزار Arc Map انجام گرفت. بدین منظور نقشه‌ی رستری واقعیت زمینی و نقشه‌های رستری پارامترهای مختلفی که احتمال می‌رفت در بروز فرونشست در منطقه موثر باشند تهیه شد و نقشه‌ها با هم تطبیق داده شدند. از آنجا که هر کدام از پارامترها، چندین کلاس را دربر می‌گیرد، برای هر کلاس باید  $W_i^+$  که در واقع وزن آن طبقه است با  $W_i^-$  که در واقع وزن بقیه‌ی طبقه‌هاست جمع شود تا وزن نهایی یا کنتراست هر طبقه تعیین گردد. بدین منظور با در نظر گرفتن تعداد پیکسل‌ها در هر لایه، روابط  $W_i^+$  و  $W_i^-$  به صورت زیر بازنویسی شده و اوزان + و - هر طبقه تعیین شد.

$$W_i^+ = \ln \frac{\frac{N Pi X_1}{N Pi X_1 + N Pi X_2}}{\frac{N Pi X_3}{N Pi X_3 + N Pi X_4}} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$W_i^- = \ln \frac{\frac{N Pi X_2}{N Pi X_1 + N Pi X_2}}{\frac{N Pi X_4}{N Pi X_3 + N Pi X_4}} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این جا:

$N Pi X_1$  = تعداد پیکسل‌هایی که هم واقعیت زمینی را در بر می‌گیرند و هم پارامتر مورد نظر را شامل می‌شوند.

$N Pi X_2$  = تعداد پیکسل‌هایی که واقعیت زمینی را در بر می‌گیرند ولی پارامتر مورد نظر در آن‌ها وجود ندارد.

$N Pi X_3$  = تعداد پیکسل‌هایی که واقعیت زمینی در آن‌ها مشاهده نمی‌شود ولی پارامتر مورد نظر را شامل می‌شوند.  
 $N Pi X_4$  = تعداد پیکسل‌هایی که نه واقعیت زمینی در آن‌ها مشاهده می‌شود و نه پارامتر مورد نظر در آن‌ها وجود دارد.  
 بر این اساس نقشه‌ی هریک از عوامل موثر بر فرونشست به نحوی تغییر داده شد که میزان value برای پیکسل‌های هر طبقه عبارت باشد از وزن نهایی آن کلاس (کنتراست). نقشه‌هایی که بدین نحو تهیه شدند، نقشه‌ی شاخص یا ایندکس نام‌دارند. در نهایت تمامی این نقشه‌های شاخص، با هم جمع شدند تا نقشه‌ی شاخص حساسیت‌پذیری در برابر فرونشست ( $SI^1$ ) به دست آید.  
 برای پهنه‌بندی نقشه‌ی شاخص حساسیت‌پذیری در برابر فرونشست، از "منحنی نرخ موفقیت" - که به اختصار SRC<sup>۲</sup> نام دارد - استفاده شد. این منحنی، رابطه‌ی بین مخاطره‌ی پیش‌بینی شده و مخاطره‌ی مشاهده‌شده را بیان می‌کند. با بررسی تغییرات شیب این منحنی می‌توان طبقات کیفی مخاطره‌ی فرونشست در منطقه را مشخص کرد.

### ۳. یافته‌های پژوهش

تاکنون علت‌های متنوعی به معلول فرونشست نسبت داده شده ولی هنوز الگوی قابل قبولی که بتواند تمامی پارامترهای موثر بر این پدیده را در نظر بگیرد ارائه نشده است. به‌ویژه ارتباط این مخاطره با تغییرات آبخوان - از آنجا که بیشتر در مناطق خشک و نیمه‌خشک و عمدتاً در کشورهای در حال توسعه اتفاق می‌افتد - به خوبی روشن نشده است. نقشه‌ی واقعیت زمینی محدوده‌ی مورد مطالعه توسط معاونت زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی در سال ۲۰۰۵ تهیه شده و اطلاعات آن مربوط به بازه‌ی زمانی یک‌ساله می‌باشد. شکل ۱، بخش‌هایی را که در شهر کرج پدیده‌ی فرونشست رخ داده است مشخص می‌کند.  
 با بررسی‌های مقدماتی و با توجه به نقشه‌ی واقعیت زمینی فرونشست کرج (شکل ۱)، احتمال می‌رود پارامتر فیزیوگرافی شیب به‌همراه پارامترهای مرتبط با آبخوان شامل ضخامت آبرفت، تغییرات سطح سفره‌ی آب زیرزمینی و اندازه‌ی ذرات و نفوذپذیری در بروز این پدیده موثر باشند.

#### ۳-۱. شیب

به‌منظور بررسی تأثیر شیب، از توپوگرافی ۱:۲۰۰۰ منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شد. براین اساس، چهار کلاس ۰ تا ۲ درجه، ۲ تا ۵ درجه، ۵ تا ۱۰ درجه و بیشتر از ۱۰ درجه در نظر گرفته شد.

#### ۳-۲. نفوذپذیری عمقی (اندازه‌ی ذرات)

به‌منظور بررسی این پارامتر در ضخامت قابل توجهی از زمین، توجه به سازند و تغییرات لیتولوژیکی، راهنمای مفید و قابل قبولی می‌باشد (Agterberg et al. 1993). براین اساس از نظر نفوذپذیری، منطقه‌ی مطالعاتی به پنج پهنه با نفوذپذیری بسیار کم (سازندهای میوسن)، کم (آبرفت هزاردره)، متوسط (آبرفت کهریزک)، به‌نسبت خوب (آبرفت‌های ریزدانه‌ی تهران) و خوب (آبرفت‌های درشت‌دانه‌ی تهران و آبرفت‌های عهد حاضر) تقسیم شد.

#### ۳-۳. ضخامت آبرفت

جهت تعیین ضخامت آبرفت پس از بررسی سونداژهای الکتریکی و مقاطع مطالعات ژئوفیزیک، با استفاده از مقیاس مقاومت لایه‌ها، لایه‌های آبرفتی در محل هر سونداژ الکتریکی، از سنگ کف تفکیک شده و بدین ترتیب ضخامت آبرفت در محل هر سونداژ مشخص شد.

<sup>1</sup> Subsidence Index

<sup>2</sup> Success Rate Curves

جدول ۱، ضخامت آبرفت در محل برخی از سونداژهای منطقه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ضخامت آبرفت در محل برخی گمانه‌های منطقه‌ی مطالعاتی

| ضخامت آبرفت (متر) | عرض جغرافیایی | طول جغرافیایی |
|-------------------|---------------|---------------|
| ۵۰                | ۳۹۵۴۹۵۲/۴     | ۴۸۹۰۹۴/۹      |
| ۱۲۵               | ۳۹۵۶۷۹۰/۳     | ۴۹۱۵۹۸/۸      |
| ۱۷۵               | ۳۹۴۹۵۳۴       | ۴۹۲۸۰۰/۵      |
| ۳۰۰               | ۳۹۶۰۸۷۳/۶     | ۴۹۴۰۱۵/۲      |
| ۳۰۰               | ۳۹۶۴۹۸۴/۳     | ۴۹۵۱۴۵        |
| ۱۵۰               | ۳۹۶۶۰۹۸/۶     | ۴۹۷۵۵۴        |
| ۲۰۰               | ۳۹۶۴۵۹۰       | ۵۰۰۳۶/۷       |
| ۲۵۰               | ۳۹۵۰۹۷۹/۷     | ۵۰۰۹۴۵/۷      |
| ۳۰۰               | ۳۹۵۸۵۱۳/۸     | ۵۰۳۸۰۹/۲      |
| ۳۰۰               | ۳۹۵۵۹۴۱/۳     | ۵۰۵۸۱۶/۸      |

به منظور اجرای مدل WoE، منطقه‌ی مورد مطالعه از نظر ضخامت آبرفت به چهار طبقه تقسیم شد. این طبقات به ترتیب عبارتند از ضخامت ۰ تا ۱۰۰ متر، ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر، ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر و بیشتر از ۲۰۰ متر.

### ۳-۴. وضعیت سطح سفره‌ی آب زیرزمینی

برای بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی در درازمدت، تغییرات کم‌آب‌ترین ماه سال‌های ابتدایی و انتهای دوره‌ی آماری (مهر ماه از سال‌های آماری ۸۲-۸۱ و ۸۸-۸۷) با هم مقایسه شدند. بر این اساس آمار تعداد ۴۱ پیژومتر در داخل و اطراف شهر کرج پردازش گردید و هیدروگراف نوسانات سطح آب زیرزمینی در تک‌تک آن‌ها ترسیم شد. بررسی‌ها نشان داد که در برخی مناطق، افت بیش از هفت متری سطح آب طی مدت ۷ سال منتهی به سال آبی ۸۸-۸۷ به ثبت رسیده است. به‌طور کلی در نواحی شمالی‌تر با افزایش سطح آب و در قسمت‌های جنوبی به سمت گلشهر و جنوب ترمینال و پایین‌تر، با کاهش سطح آب مواجهیم. به‌منظور اجرای مدل WoE، این نقشه به پنج طبقه تقسیم شد. چهار طبقه‌ی اول به ترتیب به میزان تغییرات سالانه‌ی برابر یا بیش از نیم متر افت ( $>0/5$ )، کمتر از نیم متر افت ( $0/5$  تا ۰)، کمتر از نیم متر افزایش (۰ تا  $0/5$ ) و بیشتر از نیم متر افزایش ( $>0/5$ ) اشاره دارد. طبقه‌ی پنجم نیز مناطقی را شامل می‌شود که آبرفتی نبوده و سفره‌ی آب زیرزمینی در آن‌ها تشکیل نمی‌شود.

### ۳-۵. آبخوان لایه‌ای

برای درک بهتر وضعیت آبخوان منطقه، خطوط هم تراز سطح آب زیرزمینی نیز در محدوده‌ی مطالعاتی ترسیم شدند که ناهنجاری‌های زیادی در این خطوط مشاهده شد. به نظر می‌رسد به‌هم ریختگی در برخی نقاط منحنی‌های تراز به دلیل آن است که برخی پیژومترها در لایه‌های متفاوتی حفر شده‌اند. براین اساس احتمال می‌رود که آبخوان لایه‌ای در بخش‌هایی از جنوب و جنوب‌شرق کرج وجود دارد. برای بررسی اثر آبخوان لایه‌ای بر پدیده‌ی فرونشست، موقعیت آبخوان لایه‌ای در دشت کرج به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار دیگر در مدل WoE وارد شد.

### ۳-۶. اجرای مدل WoE

پس از تهیه‌ی نقشه‌ی هر یک از این پارامترها، روابط مورد نیاز برای اجرای مدل WoE محاسبه شد. جدول ۲ مقادیر  $W_i^+$ ،  $W_i^-$  و میزان کنتراست ( $W_F$ ) برای هر کدام از کلاس‌های پارامترهای موثر را نشان می‌دهد. بر این اساس نقشه‌ی پارامترها به نحوی تغییر داده شد که

میزان value برای پیکسل‌های هر طبقه عبارت باشد از وزن نهایی آن کلاس یا همان کنتراست. نقشه‌هایی که بدین نحو تهیه شدند، نقشه‌ی شاخص یا ایندکس نام دارند. در نهایت تمامی این نقشه‌های شاخص، با هم جمع شدند تا نقشه‌ی شاخص حساسیت‌پذیری در برابر فرونشست ( $SI^1$ ) به دست آید:

$$SI = W_F \text{ بودن آبخوان} + W_F \text{ تغییرات سطح سفره} + W_F \text{ ضخامت آبرفت} + W_F \text{ نفوذپذیری} + W_F \text{ شیب} \quad (\text{رابطه ۶})$$

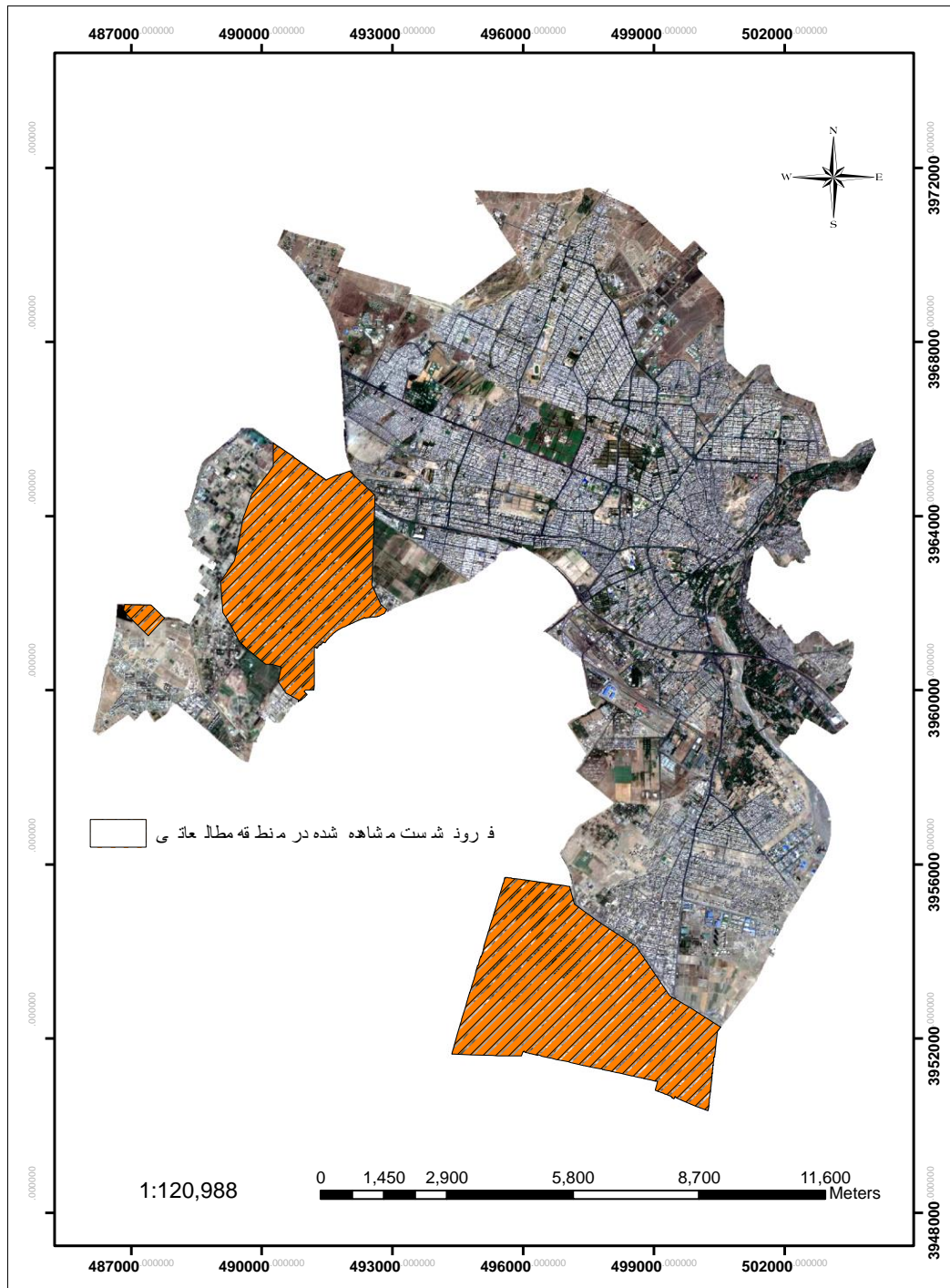
برای پهنه‌بندی نقشه‌ی شاخص حساسیت‌پذیری در برابر فرونشست از منحنی نرخ موفقیت استفاده شد. این منحنی، رابطه‌ی بین مخاطره‌ی پیش‌بینی شده و مخاطره‌ی مشاهده شده را بیان می‌کند. برای رسم این منحنی، شاخص فرونشست یا همان  $SI$  هر پیکسل در نظر گرفته شده و این شاخص‌ها از بزرگ به کوچک مرتب شدند. مقدار شاخص  $SI$  در منطقه‌ی مورد مطالعه بین  $11/09$  تا  $12/07$  متغیر است. سپس شاخص‌های مرتب‌شده، در ۱۰۰ کلاس تقسیم شدند. این تقسیم‌بندی به نحوی انجام شد که دامنه‌ی  $SI$  هر طبقه به اندازه‌ی  $(\frac{12.07 - (-11.09)}{100} = 0.2316)$  باشد. در گام بعد، این نقشه‌ی طبقه‌بندی شده با نقشه‌ی واقعیت زمینی مقایسه شده و روی آن قرار داده شد. بدین ترتیب مشخص شد که در هر طبقه‌ی یک درصدی از شاخص‌ها، چه درصدی از مخاطرات واقعی شبیه‌سازی شده‌اند. براین اساس منحنی‌ای ترسیم شد که محور افقی آن درصد حساسیت‌پذیری به فرونشست از بیشترین تا کمترین مقدار را نشان می‌دهد و محور عمودی نیز درصد فرونشست مشاهده شده را مشخص می‌کند.

جدول ۲. اوزان محاسبه شده برای طبقات مختلف پارامترهای موثر بر فرونشست در مدل WoE

| نوع پارامتر                          | طبقه | توصیف                  | $N Pi X_1$ | $N Pi X_3$ | $N Pi X_2$ | $N Pi X_4$ | $W_i^+$ | $W_i^-$ | $W_F$ | تعداد کل پیکسل‌ها | درصد فرونشست مشاهده‌ای | درصد اشغالی از کل منطقه |
|--------------------------------------|------|------------------------|------------|------------|------------|------------|---------|---------|-------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| آبخوان<br>لایه‌ای                    | ۱    | دارد                   | ۱۳۱۵۲۴     | ۱۴۶۶۰۲     | ۱۸۳۴۱۴     | ۱۲۲۹۶۲۲    | ۱/۳۷    | -۰/۴۳   | ۱/۷۹  | ۲۷۸۱۲۶            | ۴۱/۸                   | ۱۶/۴                    |
|                                      | ۲    | ندارد                  | ۱۸۳۴۱۴     | ۱۲۲۹۶۲۲    | ۱۳۱۵۲۴     | ۱۴۶۶۰۲     | -۰/۴۳   | ۱/۳۷    | -۱/۷۹ | ۱۴۱۳۰۲۶           | ۵۸/۲                   | ۸۳/۶                    |
| نفوذپذیری                            | ۱    | خیلی کم                | ۰          | ۵۳۳۸۷      | ۳۱۴۹۴۲     | ۱۳۲۱۰۳۶    | ∞       | ۰/۰۴    | ∞     | ۵۳۳۸۷             | ۰                      | ۳/۲                     |
|                                      | ۲    | ضعیف                   | ۰          | ۴۴۱۵۱      | ۳۱۴۹۴۲     | ۱۳۳۰۲۷۲    | ∞       | ۰/۰۳    | ∞     | ۴۴۱۵۱             | ۰                      | ۲/۶                     |
|                                      | ۳    | متوسط                  | ۲۴۲۵۲      | ۴۱۲۷۷۲     | ۲۹۰۵۹۰     | ۹۶۱۶۵۱     | -۱/۳۶   | ۰/۲۸    | -۱/۶۳ | ۴۳۷۱۲۴            | ۷/۷                    | ۲۵/۹                    |
|                                      | ۴    | نسبتاً خوب             | ۲۷۹۹۸۴     | ۲۳۳۵۱۸     | ۳۴۹۵۸      | ۱۱۵۰۹۰۵    | ۱/۷۰    | -۲/۰۲   | ۳/۷۲  | ۵۰۳۵۰۲            | ۹/۸۸                   | ۸/۲۹                    |
|                                      | ۵    | خوب                    | ۱۰۶۰۶      | ۶۴۰۵۹۵     | ۳۰۴۳۳۶     | ۷۳۳۸۲۸     | -۲/۶۳   | ۰/۵۹    | -۳/۲۲ | ۶۵۱۲۰۱            | ۳/۴                    | ۲۸/۵                    |
| ضخامت<br>آبرفت                       | ۱    | ۱۰۰-۰                  | ۰          | ۲۴۷۶۴۴     | ۳۱۳۴۴۴     | ۱۱۲۱۵۷۵    | ∞       | ۰/۲۰    | ∞     | ۲۴۷۶۴۴            | ۰                      | ۱۴/۷                    |
|                                      | ۲    | ۱۵۰-۱۰۰                | ۰          | ۱۴۷۴۹۵     | ۳۱۳۴۴۴     | ۱۲۲۱۷۲۴    | ∞       | ۰/۱۱    | ∞     | ۱۴۷۴۹۵            | ۰                      | ۸/۸                     |
|                                      | ۳    | ۲۰۰-۱۵۰                | ۴۱۰۳۷      | ۲۲۷۳۱۵     | ۲۷۲۴۰۷     | ۱۱۳۱۹۰۴    | -۰/۲۸   | ۰/۰۵    | -۰/۳۳ | ۲۷۸۳۵۲            | ۱۳/۱                   | ۱۶/۵                    |
|                                      | ۴    | >۲۰۰                   | ۲۷۲۴۰۷     | ۷۳۶۷۶۵     | ۴۱۰۳۷      | ۶۳۳۴۵۴     | ۰/۴۸    | -۱/۲۶   | ۱/۷۴  | ۱۰۰۹۱۷۲           | ۸۶/۹                   | ۶۰                      |
| متوسط<br>سالانه<br>تغییرات<br>سطح آب | ۱    | بیش از نیم متر افت     | ۱۷۸۵۸۳     | ۱۹۴۸۷۸     | ۱۳۶۲۴۸     | ۱۱۷۸۹۸۹    | ۱/۳۹    | -۰/۶۸   | ۲/۰۷  | ۳۷۳۴۶۱            | ۵۶/۷                   | ۲۲/۱                    |
|                                      | ۲    | کمتر از نیم متر افت    | ۵۱۶۲       | ۳۰۱۶۲۳     | ۳۰۹۶۶۹     | ۱۰۷۲۲۴۴    | -۲/۵۹   | ۰/۲۳    | -۲/۸۳ | ۳۰۶۷۸۵            | ۱/۶                    | ۱۸/۲                    |
|                                      | ۳    | کمتر از نیم متر افزایش | ۱۱۹۵۴۴     | ۴۳۹۸۱۱     | ۱۹۵۲۸۷     | ۹۳۴۰۵۶     | ۰/۱۷    | -۰/۰۹   | ۰/۲۶  | ۵۵۹۳۵۵            | ۳۸                     | ۳۳/۱                    |
|                                      | ۴    | بیش از نیم متر افزایش  | ۱۱۵۴۲      | ۳۴۰۲۶۳     | ۳۰۳۲۸۹     | ۱۰۳۳۶۰۴    | -۱/۹۱   | ۰/۲۵    | -۲/۱۶ | ۳۵۱۸۰۵            | ۳/۷                    | ۲۰/۸                    |
|                                      | ۵    | بدون سفره              | ۰          | ۹۷۲۹۲      | ۳۱۴۸۳۱     | ۱۲۷۶۵۷۵    | ∞       | ۰/۰۷    | ∞     | ۹۷۲۹۲             | ۰                      | ۵/۸                     |
| درجه شیب                             | ۱    | ۲-۰                    | ۳۰۲۶۳۶     | ۸۵۶۷۸۲     | ۱۱۶۵۸      | ۵۱۷۶۲۲     | ۰/۴۳    | -۲/۲۲   | ۲/۷۵  | ۱۱۵۹۴۱۸           | ۹۶/۳                   | ۶۸/۷                    |
|                                      | ۲    | ۵-۲                    | ۱۰۴۷۸      | ۳۴۹۹۷۲     | ۳۰۲۸۱۶     | ۱۰۲۴۴۳۲    | -۲/۰۳   | ۰/۲۶    | -۲/۲۹ | ۳۶۰۴۵۰            | ۳/۳                    | ۲۱/۳                    |
|                                      | ۳    | ۱۰-۵                   | ۷۹۳        | ۱۱۵۴۵۰     | ۳۱۳۵۰۱     | ۱۲۵۸۹۵۴    | -۳/۵۱   | ۰/۰۹    | -۳/۵۹ | ۱۱۶۲۴۳            | ۰/۳                    | ۶/۹                     |
|                                      | ۴    | >۱۰                    | ۳۸۷        | ۵۱۰۰۹      | ۳۱۳۹۰۷     | ۱۳۲۳۳۹۵    | -۳/۴۱   | ۰/۰۴    | -۳/۴۴ | ۵۱۳۹۶             | ۰/۱                    | ۳                       |

<sup>1</sup> Subsidence Index



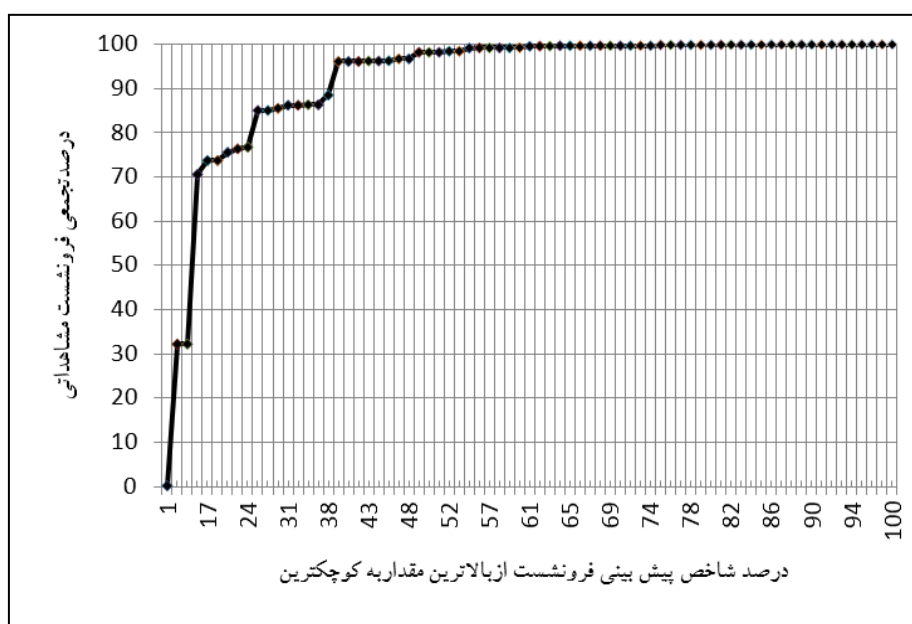


شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای منطقه‌ی مطالعاتی که بر روی آن مناطقی که فرونشست در آن‌ها اتفاق افتاده، مشخص شده است.

شکل ۲، منحنی SRC رسم شده برای منطقه‌ی مطالعاتی را نشان می‌دهد. با بررسی تغییرات شیب این منحنی مشخص شد که در ۸ درصد از منطقه‌ی مورد مطالعه که بالاترین مقادیر SI را شامل می‌شود، بیش از ۳۲ درصد از فرونشست واقعی منطقه شبیه‌سازی شده است.

همچنین، در ۱۶ درصد بالاتر SI نیز نزدیک به ۸۰ درصد از واقعیت زمینی این مخاطره شبیه‌سازی شده است. به همین ترتیب در ۲۵ و ۳۹ درصد بالاتر SI نیز به ترتیب بیش از ۸۵ و ۹۶ درصد از فرونشست رخ داده در منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی شده است. با این استدلال، با کمک منحنی SRC، مقادیر SI مرتبط با ۸، ۱۶، ۲۵ و ۳۹ درصد اول به عنوان مقادیر مرزی تقسیم‌بندی شاخص حساسیت‌پذیری به فرونشست انتخاب شده و پنج پهنه از نظر حساسیت به فرونشست تعیین شد. این پهنه‌ها عبارتند از بسیار حساس، حساس، متوسط، باحساسیت کم و باحساسیت بسیار کم. جدول ۳، مساحت هر کدام از این پهنه‌ها در منطقه‌ی مطالعاتی را مشخص می‌کند. همچنین شکل ۳، نقشه‌ی پیش‌بینی حساسیت‌پذیری به فرونشست زمین در منطقه را نشان می‌دهد.

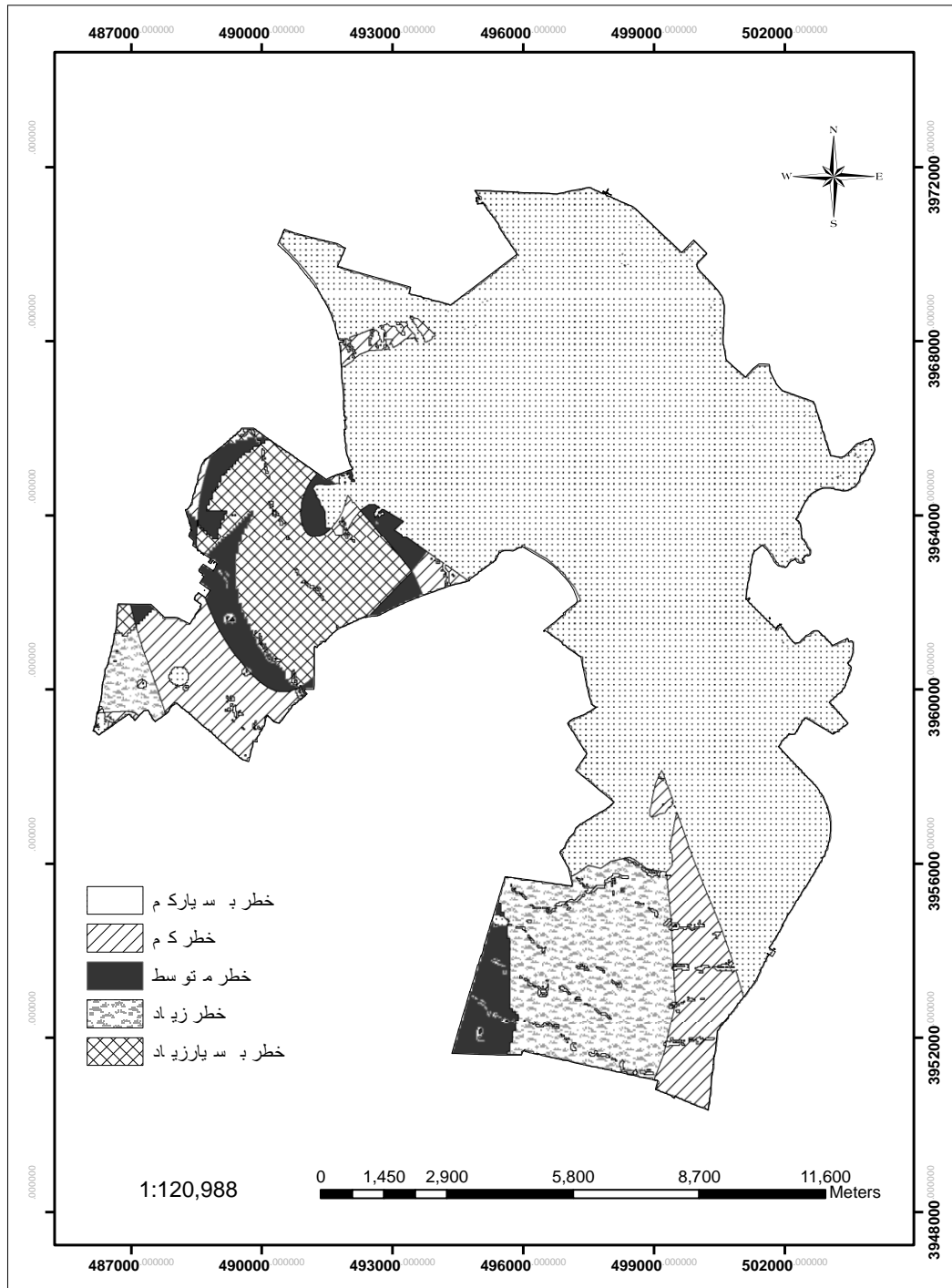
از منحنی SRC، در تعیین کارایی مدل WoE برای ارزیابی فرونشست در منطقه‌ی مطالعاتی نیز می‌توان بهره برد. هرچه سطح زیر منحنی بیشتر بوده و به صد نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده‌ی کارایی بالاتر مدل در انجام وظیفه‌ی خویش است. به عبارت دیگر هرچه قدر مدل، درصد بیشتری از مخاطرات مشاهداتی را شبیه‌سازی کند، کاراتر است. براین اساس، در منطقه‌ی مورد مطالعه، نقشه‌ی پیش‌بینی حساسیت به فرونشست، ۹۳/۶۴ درصد از واقعیت زمینی را پوشش داده است. بنابراین، نتایج WoE با دقت ۹۳/۶۴ درصد در پیش‌بینی مخاطره‌ی فرونشست مورد قبول بوده و تأیید می‌شود.



شکل ۲. منحنی نرخ موفقیت مدل WoE برای مدل‌سازی فرونشست در منطقه‌ی مطالعاتی

جدول ۳. خصوصیات طبقات تعیین‌شده برای پهنه‌بندی منطقه‌ی پژوهشی از نظر قابلیت مخاطره‌ی فرونشست

| ردیف | طبقه توصیفی حساسیت به خطر | کمترین مقدار SI دامنه | بیشترین مقدار SI دامنه | تعداد پیکسل | درصد مساحت |
|------|---------------------------|-----------------------|------------------------|-------------|------------|
| ۱    | بسیار کم                  | -۱۱/۰۹                | ۳/۰۳۷۶                 | ۱۱۳۳۶۵۸     | ۶۷/۵۲      |
| ۲    | کم                        | ۳/۰۳۷۶                | ۶/۲۸                   | ۱۵۷۳۷۹      | ۹/۳۷       |
| ۳    | متوسط                     | ۶/۲۸                  | ۸/۳۶۴۴                 | ۸۲۸۱۲       | ۴/۹۳       |
| ۴    | زیاد                      | ۸/۳۶۴۴                | ۱۰/۲۱۷۲                | ۱۷۵۶۴۳      | ۱۰/۴۶      |
| ۵    | بسیار زیاد                | ۱۰/۲۱۷۲               | ۱۲/۰۷                  | ۱۲۹۴۲۲      | ۷/۷۱       |
| ۶    | کل منطقه                  | -۱۱/۰۹                | ۱۲/۰۷                  | ۱۶۷۸۹۱۴     | ۱۰۰        |



شکل ۳. نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر فرونشست در منطقه‌ی مطالعه

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

در منطقه‌ی مورد مطالعه، اندازه‌ی پیکسل‌ها ۱۰ متر در نظر گرفته شده و با این اندازه، تعداد کل پیکسل‌ها به‌طور متوسط ۱۶۷۸۹۰۴ عدد می‌باشد که در حدود ۳۱۴۴۸۵ عدد از این پیکسل‌ها فرونشست واقعی مشاهده شده است. همان‌گونه که در جدول ۲ مشخص است، برخی از طبقات هر پارامتر، مقدار کنتراست بزرگتری دارند که نشان‌دهنده‌ی تأثیر بیشتر آن‌ها بر بروز مخاطره‌ی فرونشست است. به‌طور مثال، لایه‌ای بودن آبخوان، چنانچه از جدول برمی‌آید کنتراست بالا و مثبتی دارد که نشان می‌دهد این پارامتر تأثیر مثبتی در ایجاد فرونشست دارد. از نظر نفوذپذیری، بیشترین تأثیر بر فرونشست مربوط به آبرفت‌هایی است که نفوذپذیری به‌نسبت خوبی دارند و دارای مقداری ذرات ریزدانه نیز می‌باشند. سازند ریزدانه و درعین حال نفوذپذیر، با وزن نهایی (کنتراست) برابر ۳/۷۲، در بین طبقات مختلف تمامی پارامترها، بیشترین وزن را دارد و به‌نظر می‌رسد یکی از شرط‌های لازم و اساسی برای رخداد فرونشست در منطقه‌ی مورد مطالعه باشد. از لحاظ ضخامت آبرفت، بیشترین واقعه‌ی فرونشست در آبرفت‌های ضخیم با ضخامت بیش از ۲۰۰ متر اتفاق افتاده است. به‌علاوه، مناطقی که بیش از نیم متر در سال افت متوسط آب زیرزمینی داشته‌اند نیز با وزن نهایی ۲/۰۷، موثرین طبقه‌ی نوسانات سطح سفره بر پدیده‌ی فرونشست بوده‌اند. همچنین به نظر می‌رسد شیب‌های کمتر از دو درجه، مستعدترین شرایط شیب را برای بروز فرونشست ایجاد می‌کنند (وزن نهایی ۲/۷۵).

چنانچه از این جدول برمی‌آید برخی وزن‌ها نیز حدود صفر می‌باشند که این مسأله نشان از آن دارد که فاکتور مربوطه هیچ‌گونه تأثیر مثبت یا منفی بر ایجاد مخاطره ندارد. به عنوان مثال به نظر می‌رسد افزایش کمتر از نیم متر به سطح تراز آب سفره‌های زیرزمینی که وزن نهایی آن ۰/۲۶ می‌باشد، تأثیر قابل توجهی بر تقویت یا کاهش مخاطره‌ی فرونشست در منطقه‌ی مطالعاتی ندارد. با توجه به دقت بالای ۹۳/۶۴ درصدی مدل WoE در ارزیابی مخاطره‌ی فرونشست در منطقه‌ی مطالعاتی، می‌توان این مدل را مدلی کارآمد در مطالعه و پیش‌بینی مخاطرات به‌ویژه در مخاطره‌ی ژئومورفولوژیک فرونشست در آبخیزهای شهری دانست. چنانچه انتظار می‌رفت مهمترین دلیل بروز این مخاطره در منطقه‌ی پژوهش، مشخصات مرتبط با آبخوان و تغییرات سطح سفره‌ی آب زیرزمینی می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بسیاری از مناطق کرج از امنیت خوبی در برابر مخاطره‌ی فرونشست برخوردارند ولی استعداد این مخاطره در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی شهر بالاست و لازمست در برنامه‌های مدیریتی شهر مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود به منظور بررسی کامل فرونشست منطقه، بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی منطقه مجهز به سیستم‌های پایش فرونشست گردد و ارتباط نرخ فرونشست با عوامل محرک، بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد.

#### ۵. سپاسگزاری

از زحمات آقایان دکتر علی‌اکبر نوروزی، مهندس محمدجواد بلورچی و دکتر ضیاءالدین شعاعی که بی‌دریغ در انجام این پژوهش همکاری نمودند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

#### References

- Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., Cheng, Q., & Wright, D. F. (1993). Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping. In J. C. Davis & U. C. Herzfeld (Eds.), *Computers in geology, 25 years of progress* (pp. 13–32). Oxford University Press.
- Aranda-Gómez, J., Pacheco-Martínez, J., Levresse, G., Chacón-Baca, E., Charles-Polo, M., González-Naranjo, G., & del Rosal, A. (2010). Subsidence caused by groundwater withdrawal at the bottom of the Rincón de Parangueo Maar, Mexico. *Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS)*, Juriquilla, Querétaro, Mexico.
- Audiguier, M., Cojean, R., & Geremew, Z. (2010). Microcracking of expansive soils during shrinkage processes: Roles of mineralogy and microstructure. *Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS)*, Juriquilla, Querétaro, Mexico.

- Buffardi, C., & Ruberti, D. (2023). The issue of land subsidence in coastal and alluvial plains: A bibliometric review. *Remote Sensing*, 15(9), 2409.
- Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., & Wright, D. F. (1988). Integration of geological data sets 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. (1989). Weights of evidence modelling: A new approach to mapping mineral potential. *Statistical Applications in Earth Sciences, Geological Survey of Canada Paper*, 89-9, 171–183.
- Bonham-Carter, G. F. (1994). Geographic information systems for geoscientists: Modeling with GIS. *Computer Methods in the Geosciences*, 13, 267–302. Pergamon.
- Burbey, T. J. (2010). Mechanisms for earth fissure formation in heavily pumped basins. In *Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS)*, Juriquilla, Querétaro, Mexico.
- Calderhead, A. I., Martel, R., Garfias, J., & Therrien, R. (2010). Effects on land subsidence in the Toluca Valley, Mexico. In *Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS)*, Juriquilla, Querétaro, Mexico.
- Cerca, M., Carreón-Freyre, D., & Gutiérrez, R. (2010). Instability of the urbanized flank of “El Peñón del Marques” volcanic edifice and its relation to land subsidence in Mexico City. In *Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS)*, Juriquilla, Querétaro, Mexico.
- Coal Industry Promotion Board. (1999). *Fundamental investigation report of the stability test for Gosari*. Coal Industry Promotion Board, 6, 7–22.
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Masuda, T., & Nishino, K. (2007). GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 52(5), 1073-1086. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0818-3>.
- Emmanuel, J., Carranza, M., & Hale, M. (2000). Geologically constrained probabilistic mapping of gold potential, Baguio district, Philippines. *Natural Resources Journal*, 9, 237–253.
- Gutiérrez, J. J., Vallejo, L. E., Lin, S., & Painter, R. (2010). Impact of longwall mining of coal on highways in southwestern Pennsylvania. *Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS)*, Juriquilla, Querétaro, Mexico.
- Heywood, C. E. (1997). Piezometric-extensometric estimations of specific storage in the Albuquerque Basin, New Mexico. In K. R. Prince & S. A. Leake (Eds.), *U.S. Geological Survey Subsidence Interest Group Conference: Proceedings of the technical meeting, Las Vegas, Nevada, February 14–16, 1995* (U.S. Geological Survey Open-File Report 97–47, pp. 21–26).
- Hoffmann, J., Leake, S. A., Galloway, D. L., & Wilson, A. M. (2003). *MODFLOW-2000 Ground-Water Model—User guide to the subsidence and aquifer-system compaction (SUB) package*. U.S. Geological Survey Ground-Water Resources Program. U.S. Department of the Interior.
- Hyun-Joo Oh, H., & Lee, S. (2010). Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model. *Engineering Geology*, 115(1-2), 36-48.
- Mathew, J., Jha, V. K., & Rawat, G. S. (2007). Weights of evidence modelling for landslide hazard zonation mapping in part of Bhagirathi valley, Uttarakhand. *Current Science*, 92(5), 628-638.
- Meinzer, O. E. (1928). Compressibility & elasticity of artesian aquifers. *Economic Geology*, 23, 263.
- National Research Council. (1991). *Mitigation losses from land subsidence in the United States*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Ochoa-González, G., & Carreón-Freyre, D. (2010). Integration of geological and hydrogeological features for subsidence modelling in volcanic zones. *Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS)*, Juriquilla, Querétaro, Mexico.
- Pakravan, S. (2005). Assessment of subsidence in the cause of groundwater in Tehran (M.S. thesis, Tehran University). (In Persian)
- Phien-wej, N., Giao, P. H., & Nutalaya, P. (2006). Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 82, 187–201.
- Poland, F. J., Carbognin, L., Yamamoto, S., & working group. (1984). Economic & social impacts & legal considerations. In *Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal* (p. 120).
- Poland, J. F., & Ireland, R. L. (1988). Land subsidence in the Santa Clara Valley, California, as of 1982: U.S. Geological Survey Professional Paper 497-F, 61 p.
- Riley, F. S. (1969). Analysis of borehole extensometer data from central California. In *International Association of Scientific Hydrology Publication* (Vol. 89, pp. 423–431).

Soeters, R., & Van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and mitigation* (Special Report 247, pp. 129–177). Washington, DC: National Academy Press.

Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2004). A comparison of the GIS-based landslide susceptibility assessment methods: Multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45, 665–679.

Tianliang, Y., Xuexin, Y., Hanmei, W., Longxi, Z., Zhun, X., & Yibin, Z. (2010). Analysis of engineering land subsidence effect caused by shield construction for tunnels. *Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS)*, Juriquilla, Querétaro, Mexico.

Vaezi Nejad, S. M., Toufigh, M. M., & Marandi, S. M. (2010). Zonation and prediction of land subsidence: Case study, Kerman, Iran. *Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS)*, Juriquilla, Querétaro, Mexico.

Yazdani, H., Toufigh, M., & Masoudzade, A. (2010). Nonlinear analysis of land subsidence due to groundwater level oscillation by a finite difference method. *Eighth International Symposium on Land Subsidence (EISOLS)*, Juriquilla, Querétaro, Mexico.

Zare, M. (2010). Landslide risk zonation using fuzzy logic methodology (case study: Vaz watershed) (M.S. thesis, Tehran University). (In Persian)