



Land Subsidence Hazard Zoning in Hashtgerd Plain based on Integrated Multi-Criteria Decision-Making Approach: WOI-BWM

Shabnam Mehrnoor ^a, Maryam Robati^{b*}, Mir Masoud Kheirkhah Zarkesh^c, Forough Farsad^b, Shahram Baikpour^b

^a PhD Candidate in Environmental Science, Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^b Assistant Professor, Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^c Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2 March 2022

Revised: 5 July 2022

Accepted: 9 July 2022

Abstract

The occurrence of land subsidence phenomenon and its potential hazards in the plains of Iran due to the water crisis and drought period has grown significantly in recent years. In this study, the zoning of land subsidence hazard in the Hashtgerd plain was discussed and 19 criteria were selected as factors that influence the subsidence. The mentioned layers were prepared in GIS, weighted based on the best-worst method (BWM) and integrated using the Weighted Overlay Index (WOI). The results of BWM method showed that groundwater abstraction (0.219), the type of geological formation (0.157), the decrease of groundwater level (0.079), and groundwater depth (0.078) are important factors on the potential of subsidence hazard in the study area. Moreover, in order to evaluate the results of this model, the ROC curve was used, which has an accuracy of 90%. The results showed that land subsidence hazard of 10.66% of the study area was in very low category, 38.51% in low category, 31.49% in medium category, 11.66% in high category and 7.69% is in the very high category. According to the results, there are areas with a high probability of subsidence in the central part of Hashtgerd Plain, which requires continuous evaluation, controlling, and monitoring of the criteria that affect the situation.

Keywords: Land Subsidence, Aquifer Recharge, Hashtgerd Plain, Bwm Model

*. Corresponding author: Maryam Robati E-mail: m.robati@srbiau.ac.ir Tel: + 989125038338

How to cite this Article: Mehrnoor, Sh., Robati, M., Kheirkhah Zarkesh, MM. Farsad, F., & Baikpour, Sh. (2022). Land subsidence hazard zoning in Hashtgerd Plain based on an integrated multi-criteria decision-making approach: WOI-BWM. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 127-148.

DOI:10.22067/geoeh.2022.75445.1188



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75445.1188>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۱۴۸-۱۲۷

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد بر اساس رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چند معیار:

WOI-BWM

شبیم مهرنور - دانشجوی دکتری علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
 مریم رباطی^۱ - استادیار، گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
 میرمسعود خیرخواه زرکش - دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی.
 فروغ فرساد - استادیار، گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
 شهرام بیک‌پور - استادیار، گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۱۴ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۱۸

چکیده

وقوع پدیده فرونشست زمین و خطرات احتمالی آن در دشت‌های ایران به علت بروز بحران آب و خشکسالی، طی سالیان اخیر رشد چشمگیری داشته است. در این مطالعه به پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست در دشت هشتگرد پرداخته و نوزده معیار شامل میزان افت آب زیرزمینی، برداشت آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، ضخامت آبرفت، تغذیه آبخوان، تراکم چاه‌ها، تراکم زهکشی، عمق سطح آب زیرزمینی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق سنگ‌بستر، متوسط بارش سالانه، متوسط دمای سالانه، نوع اقلیم سرزمین، کاربری کشاورزی، کاربری شهری، کاربری صنعتی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و فاصله از گسل به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست منطقه انتخاب شدند. لایه‌های مذکور در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه، بر اساس مدل بهترین-بدترین (BWM) وزن دهی و با استفاده از شاخص هم‌پوشانی

Email: m.robati@srbiau.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۵۰۳۸۳۳۸

نحوه ارجاع به این مقاله:

مهرنور، شبیم؛ رباطی، مریم؛ خیرخواه زرکش، میرمسعود؛ فرساد، فروغ؛ بیک‌پور، شهرام؛ ۱۴۰۱. پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد بر اساس رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چندمعیار: WOI-BWM. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۴).

صص ۱۴۸-۱۲۷

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75445.1188>

وزین (WIO) ادغام شدند. نتایج روش BWM نشان داد عوامل برداشت از آب زیرزمینی (۰/۲۱۹)، نوع سازند زمین شناسی (۰/۱۵۷)، افت سطح آب زیرزمینی (۰/۰۷۹) و عمق آب زیرزمینی (۰/۰۷۸) اهمیت بیشتری بر پتانسیل خطر فرونشست در منطقه مورد مطالعه دارند. همچنین به منظور ارزیابی نتایج این مدل از منحنی (ROC) استفاده شد که دارای دقتی معادل ۹۰ درصد است. نتایج نشان داد که ۱۰/۶۶، ۳۸/۵۱، ۳۱/۴۹، ۱۱/۶۶ و ۷/۶۹ درصد از مساحت دشت هشتگرد به ترتیب به طبقه خطر خیلی کم، کم، متوسط، پرخطر و خیلی پرخطر اختصاص یافته است که بر این اساس مناطقی با احتمال فرونشست زیاد در نیمه مرکزی دشت هشتگرد قرار دارند که مستلزم ارزیابی، نظارت و پایش مستمر عوامل مؤثر در وقوع پدیده فرونشست توسط مدیران و برنامه ریزان شهری است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، تغذیه آبخوان، دشت هشتگرد، مدل BWM.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، یک خطر زمین شناسی که در بسیاری از شهرهای جهان گسترش یافته است، مسأله فرونشست زمین است (چن^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). فرونشست زمین، همان‌طور که توسط یونسکو تعریف شده است، شامل نشست یا نشست تدریجی سطح زمین به سمت پایین است که ممکن است با جابه‌جایی‌های عمودی با بردار اندک افقی نیز همراه باشد (یونسکو^۲، ۲۰۱۸). فرونشست زمین یکی از پیامدهای استفاده بی‌رویه و سوء مدیریت از منابع آبی است که به دلیل فشردگی خاک در اثر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد (پاچکو^۳ و همکاران، ۲۰۰۶) که باعث آسیب به محیط طبیعی و حتی خسارات اقتصادی می‌شود (هو^۴ و همکاران، ۲۰۰۹). در فعالیت‌های انسانی، این پدیده متأثر از فعالیت‌هایی مانند برداشت بیش‌ازحد آب از سفره‌های زیرزمینی (وانگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۹؛ ندیری^۶ و همکاران، ۲۰۱۸)؛ زهکشی خاک‌های آلی (توسی^۷ و همکاران، ۲۰۱۳)؛ استخراج سوخت‌های فسیلی و استخراج زیرسطحی همچون معدنکاری (گالوی^۸، ۲۰۱۶)؛ افزایش حفاری چاه‌های بهره‌برداری (ژانگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۹) و پدیده‌های طبیعی زمین شناسی همچون حرکات تکتونیکی گسل‌ها (سوپاتا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰؛ پرادهان^{۱۱}

- 1 Chen
- 2 UNESCO
- 3 Pacheco
- 4 Hu
- 5 Wang
- 6 Nadiri
- 7 Tosi
- 8 Galloway
- 9 Zhang
- 10 Sopata
- 11 Pradhan

و همکاران، ۲۰۱۴) و کارستی شدن به دلیل انحلال سنگ آهک (دزیر^۱ و همکاران، ۲۰۱۸) است. فرونشست اگرچه پیامد فشردگی سطوح زیرین خاک است لیکن خود معرف حدوث و پیامد ناگوار زیست محیطی در افق آتی است. فشردگی سطوح زیرین و افت عمق ایستابی، کاهش حجم و فضای نگهداشت آب را به دنبال خواهد داشت. به بیان ساده تر کاهش مخزن آب زیرزمینی پیامد منطقی رخداد پدیده فرونشست است (شریفی کیا و همکاران، ۱۳۹۴) که می تواند خسارت های شدیدی به تأسیسات انسان ساخت (ساختمان)، باند فرودگاه ها، پل ها، تونل ها، خیابان ها، خطوط حمل و نقل ریلی و جاده ای، کاهش حاصلخیزی زمین های کشاورزی (با فشردگی و از بین رفتن تخلخل موجود در خاک)، اختلال در الگوی جریان ها و تداخل آب شور و شیرین و تخریب مستحذات زیر سطحی (قنات ها، شبکه سوخت و آب رسانی، تونل های شهری و معادن) را به دنبال داشته باشد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۸). از آنجایی که اولین گام در مطالعه این پدیده، شناخت گستره فضایی آن و اندازه گیری هر چه دقیق تر میزان فرونشست است؛ بنابراین با شناخت مشخصات مکانی و زمانی این پدیده، امکان ارائه و توسعه مدل منطقه ای این پدیده میسر شده (مهرابی و غضنفری پور، ۱۳۹۸) و از این طریق می توان زیرساخت مناسبی از منابع داده و اطلاعاتی را برای مدیران و دست اندرکاران در راستای تعدیل، کنترل و پیشگیری از فاجعه فراهم آورد (شریفی کیا و همکاران، ۱۳۹۲). مطالعات متعددی برای ارزیابی فرونشست با استفاده از سه رویکرد: الف) مدل های ریاضی با استفاده از مدل های جریان آب زیرزمینی و مدل های فرونشست برای بررسی اثرات کاهش سطح آب منجر به فرونشست؛ ب) تکنیک های سنجش از دور برای نظارت بر فرونشست زمین با قابلیت بررسی روابط احتمالی با رویکرد هیدروژئولوژیکی؛ ج) استفاده از تکنیک های GIS برای نقشه برداری مناطق آسیب پذیر در برابر فرونشست انجام شده است (صادق فام^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). در جدول (۱) سابقه ای از آن ارائه شده است.

جدول ۱- مرور منابعی از مطالعات مرتبط با پدیده فرونشست

نویسندگان	داده های مورد استفاده	موقعیت	نتایج کلیدی	طبقه
مدنی ^۳ و همکاران (۲۰۱۳)	تغییر شکل زمین، خصوصیات خاک زیرین و رژیم آب های زیرزمینی	بلوگنا (ایتالیا)	همبستگی بین فرونشست زمین، برداشت آب زیرزمینی و خاک های زیرین شناسایی شد.	مدل های آماری و تجربی
فانت ^۴ و همکاران (۲۰۱۶)	جریان آب های سطحی، نقشه های کاربری زمین و داده های آب و هوا	کالیفرنیا (آمریکا)	ارزیابی استراتژی های مدیریتی برای کاهش اثرات نامطلوب فرونشست صورت گرفت.	

1 Desir

2 Sadeghfam

3 Modoni

4 Faunt

نتایج کلیدی	موقعیت	داده‌های مورد استفاده	نویسندگان	طبقه
پهنه‌بندی خطر فرونشست، مکان و سطوح بالقوه خطر را برای مدیریت پیشگیری از خطر برجسته می‌کند.	دره کاتماندو (نیپال)	خصوصیات فیزیکی، اقلیم، تغذیه آب‌های زیرزمینی، تراکم‌پذیری و نوسان سطح آب‌های زیرزمینی	شرستها ^۱ و همکاران (۲۰۱۷)	
میزان فرونشست دارای تغییرات فضایی و زمانی است که ناشی از استفاده بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی، بار سازه‌ها و فعالیت‌های زمین‌شناسی در منطقه است.	جاکارتا (اندونزی)	تصاویر راداری InSAR و GPS	آبیدین ^۲ و همکاران (۲۰۱۵)	مدل‌هایی بر پایه InSAR
منطقه به دلیل نداشتن موانع ژئومورفولوژی، در طی سال‌های اخیر با روند توسعه ساخت‌وسازها، توسعه فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی مواجه شده و همین امر سبب افزایش بهره‌برداری و پدیده فرونشست شده است.	پاکدشت (ایران)	تصاویر سنتینل ۱	ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)	
نتایج نشان داد که مدل FR در پیش‌بینی نسبت به مدل تابع باور شواهد دقت کمتری دارد.	دره کیتتا (مالزی)	ارتفاع، شیب، جهت، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، NDVI، خاک، قدرت جریان رودخانه، رطوبت، توپوگرافی	پرادهان ^۳ و همکاران (۲۰۱۴)	
آن‌ها بیان کردند برداشت آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن سنگ‌شناسی و فاصله از رودخانه‌ها مهم‌ترین عوامل در فرونشست هستند.	کاشمر (ایران)	فاصله از قنات، کاربری اراضی، فاصله از زمین‌های جنگلی، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل‌ها، سطح آب زیرزمینی	رحمتی ^۴ و همکاران (۲۰۱۹)	

در حال حاضر، این پدیده به همراه پیامدهای زیست‌محیطی آن در اکثر دشت‌های دنیا به چشم می‌خورد (رهنما و میراثی^۵، ۲۰۱۶). در ایران نیز فرونشست سابقه طولانی دارد. در واقع با توجه به وضعیت نیمه‌خشک بسیاری از مناطق ایران و نیاز به منابع آبی، میزان بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی بسیار بیشتر از میزان تغذیه آن‌ها است، به همین دلیل تحت تأثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی، بسیاری از دشت‌های ایران با فرونشست مواجه هستند (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۹). در این میان، یکی از مناطقی که با مخاطره فرونشست مواجه است، دشت هشتگرد در غرب استان تهران است که با توجه به اهمیت موضوع در این تحقیق به ارزیابی میزان فرونشست آن پرداخته شده است. بررسی‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (۱۳۸۶) با استفاده از روش تداخل سنجی ماهواره‌ای

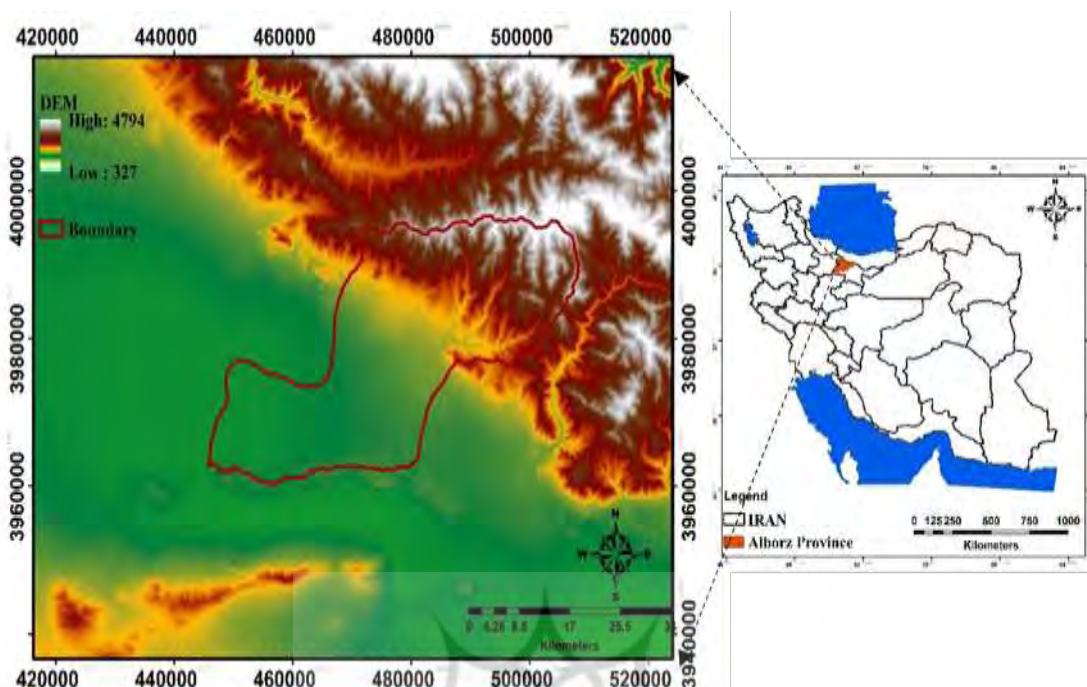
- 1 Shrestha
- 2 Abidin
- 3 Pradhan
- 4 Rahmati
- 5 Rahnema & Mirassi

امواج رادار نشان داده است که در پهنه‌ای گسترده از این دشت، فرونشست زمین با نرخ بیشینه ۱۶ و نرخ میانگین ۸/۴ سانتی‌متر بر سال شکل گرفته است. این دشت در سال‌های اخیر به‌طور جدی با بحران خشکسالی و کاهش سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است. همچنین گمان می‌رود که در آینده نیز با توجه به تغییرات اقلیمی و با فرض ادامه یافتن شرایط موجود در برداشت از منابع آب زیرزمینی، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و بالطبع آن پدیده فرونشست با شدت و گستردگی بیشتری ادامه یابد. لذا تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست برای حفاظت از منابع انسانی و طبیعی و کاهش خسارات ناشی از وقوع آن می‌تواند کمک شایانی به مردم محلی و مراکز ذی‌صلاح نماید. در این راستا، هدف از پژوهش حاضر شناسایی و طبقه‌بندی نواحی حساس بر اساس مدل شاخص همپوشانی وزین، تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرونشست با استفاده از روش وزن‌دهی BWM و ارزیابی صحت این مدل در دشت هشتگرد است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

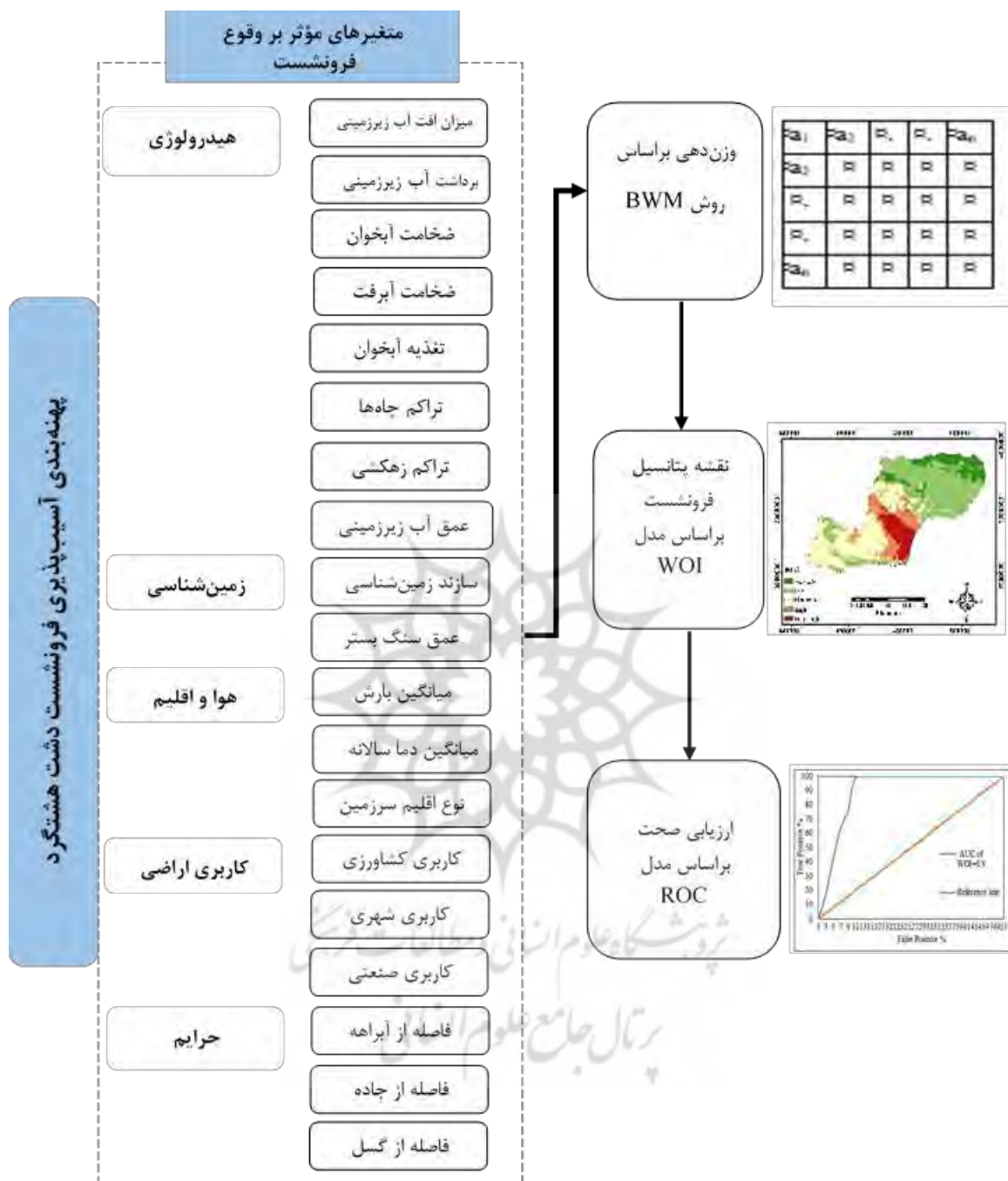
دشت هشتگرد از دیدگاه تقسیمات کشوری در استان البرز قرار دارد. مساحت این حوضه در حدود ۱۱۶۸/۸ کیلومتر مربع است که در عرض جغرافیایی $35^{\circ} 47' 45''$ تا $36^{\circ} 03' 05''$ شمالی و طول جغرافیایی $50^{\circ} 29' 05''$ تا $50^{\circ} 54' 28''$ شرقی قرار دارد. آب‌وهوای منطقه در بخش‌های شمالی، نیمه مرطوب است و به تدریج به سوی جنوب دشت با کاهش ارتفاع به نیمه‌خشک تبدیل می‌شود (شکل ۱). بررسی‌های زمین‌شناسی منطقه برای شناخت پدیده فرونشست ضروری است. به‌طور کلی از دیدگاه هدایت هیدرولیکی، سازندهای زمین‌شناسی این محدوده به ۴ گروه اصلی تقسیم می‌شوند: الف) سازندهایی با نفوذپذیری بسیار کم؛ ب) سازندهایی با نفوذپذیری کم؛ پ) سازندهایی با نفوذپذیری متوسط و ت) سازندهایی با نفوذپذیری زیاد تا خیلی زیاد. همچنین ساختار زمین‌ساختی ناحیه مورد مطالعه از فعالیت‌های زمین‌ساختی البرز تأثیر پذیرفته است. به همین دلیل، بیشتر چین‌خوردگی‌ها و گسل‌ها، روند خاوری-باختری دارند. از گسل‌های مهم این منطقه می‌توان گسل آبیگ، گسل جنوب طالقان و گسل ولیان را نام برد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، ۱۳۸۶).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

۲-۲- روش انجام پژوهش

پژوهش حاضر در پنج مرحله کلی به انجام رسیده است که شامل: (۱) شناسایی متغیرهای محیطی تأثیرگذار، (۲) آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی مربوط به متغیرهای محیطی مؤثر بر وقوع فرونشست زمین، (۳) بررسی اهمیت متغیرهای محیطی بر اساس روش بهترین-بدترین (BWM)، (۴) اجرای مدل شاخص همپوشانی وزین و تهیه نقشه پهنه‌بندی فرونشست زمین و (۵) اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) است. مراحل کلی این پژوهش در شکل نمایش داده شده است (شکل ۲).



شکل ۲- مراحل انجام فرآیند پهنه‌بندی فرونشست در دشت هشتگرد

۲-۲-۱- تعیین معیارهای مؤثر بر فرونشست

در این پژوهش، با توجه به شرایط دشت هشتگرد، مرور منابع و همچنین نظر افراد خبره، معیارهای تأثیرگذار در پهنه‌بندی فرونشست زمین در ۲ بعد فیزیکی- شیمیایی و اقتصادی- اجتماعی، ۵ گروه معیارهای هیدرولوژی، زمین‌شناسی، هوا و اقلیم، کاربری اراضی و حرایم و ۱۹ زیرمعیار شامل میزان افت آب زیرزمینی، برداشت آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، ضخامت آبرفت، تغذیه آبخوان، تراکم چاه‌ها، تراکم زهکشی، عمق سطح آب زیرزمینی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق سنگ‌بستر، میزان بارش سالانه، متوسط دمای سالانه، نوع اقلیم سرزمین، کاربری کشاورزی، کاربری شهری، کاربری صنعتی، فاصله از آبراه‌ها، فاصله از جاده‌ها و فاصله از گسل‌ها تدوین شدند. **عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)** در پژوهشی بیان کردند که افت سطح آب، فاصله از رودخانه و لیتولوژی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرونشست زمین در دشت اردبیل است. **محمدی^۱ و همکاران (۲۰۱۹)** برداشت از آب‌های زیرزمینی، ساختار زمین‌شناسی، فاصله از گسل و درصد شیب را از عوامل مؤثر در فرونشست بیان کردند.

۲-۲-۲- آماده‌سازی معیارها

با تعیین مجموعه‌ای از معیارها، نیاز است که هر معیار به صورت یک لایه نقشه در پایگاه داده‌های مبتنی بر GIS نشان داده شوند. در ذیل به تشریح معیارها خواهیم پرداخت:

- فاصله از آبراه‌ها: آبراه‌ها با افزایش فشار آب منفذی یکی از عوامل مهم در القاء ناپایداری در منطقه است (**رنجگر^۲ و همکاران، ۲۰۲۱؛ قربان‌زاده^۳ و همکاران، ۲۰۲۰**). لذا نقشه آبراه‌ها از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه استخراج گردید و سپس با استفاده از ابزار Distance در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه فاصله از آبراه تهیه گردید که مقادیر پیوسته آن بین صفر تا ۴۸۲۶ متر است.

فاصله از گسل: گسل‌ها نقش بسیار مهمی در شکستگی و خوردشدگی واحدهای زمین‌شناسی و حرکت‌های توده‌ای دارند (**نگهبان و همکاران، ۱۴۰۰**). لرزش ناشی از ایجاد گسل می‌تواند باعث تشکیل یک تراکم غیر الاستیک به دلیل افزایش تنش مؤثر در خاک و ایجاد فرونشست شود (**گالوی^۴ و همکاران، ۱۹۹۹؛ ناوارو هرناندز^۵ و همکاران، ۲۰۲۰**). در این پژوهش، گسل‌های منطقه از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استخراج گردید و سپس با استفاده از ابزار Distance در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه فاصله از گسل تهیه گردید.

میزان برداشت آب و افت سطح آب‌های زیرزمینی: یکی از دلایل فرونشست زمین مربوط به عکس‌العمل طبیعی آن در مقابل بهره‌برداری بیش از اندازه و بالطبع آن افت سطح آب‌های زیرزمینی به دلیل کاهش فشار هیدرولیکی و

1 Mohammadi

2 Ranjgar

3 Ghorbanzadeh

4 Galloway

5 Navarro-Hernández

افزایش تنش بر رسوبات است (هانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۲؛ هو^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). در این پژوهش، به منظور تهیه نقشه میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی از اطلاعات تغییرات دوره ۱۵ ساله عمق آب از شرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) استفاده شده است و سپس با استفاده از روش درون‌یابی IDW نقشه پیوسته میزان افت سطح آب زیرزمینی تهیه شد. همچنین، میزان برداشت آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های تخلیه چاه‌های بهره‌برداري تهیه گردید و سپس با استفاده از روش درون‌یابی IDW نقشه پیوسته برداشت آب زیرزمینی تهیه شد. در نقشه پیوسته مقادیر آن بین ۷ تا ۱۷۵۶ مترمکعب است.

تغذیه: تغذیه یکی از عوامل هیدرولوژیکی مؤثر در فرونشست است. هرچه میزان تغذیه بیشتر باشد، فشار هیدرولیکی بیشتر شده و فاصله بین دانه‌ها افزایش می‌یابد که در نتیجه تنش مؤثر کاهش یافته و احتمال وقوع فرونشست کمتر می‌شود (صادق‌فام^۳ و همکاران، ۲۰۲۰؛ ندیری^۴ و همکاران، ۲۰۱۸). در این پژوهش، جهت تهیه لایه تغذیه از روش پیسکوپو (پیسکوپو، ۲۰۰۱) استفاده شد. در روش پیسکوپو، لایه شیب زمین، بارندگی و نفوذپذیری سطحی خاک (عمق ۰/۵ تا ۲ متری خاک سطحی) به لایه رستری تبدیل و با وزن‌دهی و رویهم‌گذاری لایه‌ها، نقشه پیوسته تغذیه تهیه شد که مقادیر آن بین ۰/۳۹ تا یک است.

ضخامت آبرفت: این ضخامت شامل فاصله بین سطح زمین تا سنگ کف است. در حالت کلی مشاهده می‌شود که نشست بیشتر در لایه‌هایی اتفاق می‌افتد که ضخامت آبرفت بیشتر باشد زیرا اگر ضخامت آبرفت منطقه بیشتر شود آب زیادی می‌توان استخراج کرد. برای تهیه این لایه از داده‌های ژئوفیزیک سطحی و چاه‌پیمایی که از شرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) اخذ شده بود، میزان ضخامت آبرفت در هر چاه منطقه محاسبه گردید و سپس این نقاط بر اساس روش IDW درون‌یابی شد و به فایل رستری تبدیل گردید و بدین ترتیب لایه پیوسته ضخامت آبخوان به دست آمد که مقادیر آن بین ۶۰ تا ۳۲۹ متر است.

پارامترهای اقلیمی: پارامترهای اقلیمی به خصوص دما و بارش به دلیل تأثیری که بر آب‌های زیرزمینی دارد؛ یکی از عوامل مؤثر در پدیده فرونشست است (ژنگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۷؛ تفرشی^۶ و همکاران، ۲۰۱۹). لذا در این پژوهش، داده‌های جدولی همانند موقعیت و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی مربوط به میانگین بارندگی سالیانه و میانگین دمای سالیانه منطقه مورد مطالعه به صورت نقطه به محیط نرم‌افزار ArcGIS وارد گردیده و سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی IDW به نقشه هم‌باران سالیانه و هم‌دمای سالیانه تبدیل گردید. مقادیر نقشه هم‌باران بین ۱۹۹ تا

1 Huang

2 Hu

3 Sadeghfam

4 Nadiri

5 Piscopo

6 Zheng

7 Tafreshi

۸۵۰ میلی متر در سال و مقادیر هم‌دما بین صفر تا ۱۴ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، فرونشست معمولاً در اقلیم‌های خشک که هم برداشت از آب زیرزمینی بیشتر است و هم تغذیه سفره آب زیرزمینی ضعیف‌تر است اتفاق می‌افتد. نقشه نوع اقلیم در منطقه مورد مطالعه از سازمان هواشناسی استان البرز دریافت گردید که بر اساس آن اقلیم منطقه دارای ۶ کلاس است که کلاس اول معرف خشک‌ترین و کلاس ششم معرف مرطوب‌ترین کلاس اقلیمی است. سازندهای زمین‌شناسی: سنگ‌ها به واسطه تفاوت در جنس رسوبات تشکیل‌دهنده و شرایط و دوران شکل‌گیری، مقاومت‌های مختلفی را در مقابل نیروهای خارجی از خود نشان می‌دهند (کانفورتی^۱ و همکاران، ۲۰۱۴؛ مختاری و عابدیان^۲، ۲۰۱۹). به همین منظور، نقشه رقومی سنگ‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی (۱۳۹۹) دریافت گردید و خصوصیات واحدهای سنگ‌شناسی استخراج گردید (جدول ۲). منطقه هشتگرد دارای ۱۹ کلاس سازند زمین‌شناسی است که سازندها بر اساس جنس مواد تشکیل‌دهنده رتبه‌بندی شدند.

جدول ۲- واحدهای سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

ردیف	واحد	سنگ‌شناسی	ردیف	واحد	سنگ‌شناسی
۱	Qft ₂	مخروط‌افکنه‌ها و تراس‌های آبرفتی کم ارتفاع جدید	۱۱	Mm,s,l	مارن، ماسه‌سنگ آهکی، سنگ‌آهک، کنگلومرا
۲	TRJs	ماسه‌سنگ و شیل	۱۲	Ek	توف و شیل توفی
۳	Qft ₁	مخروط‌افکنه‌ها و تراس‌های آبرفتی مرتفع قدیمی	۱۳	Eksh	شیل آهکی، شیل سیلتی با میان لایه توف شیشه‌ای
۴	Qcf	کفه رسی	۱۴	PeEz	سنگ‌آهک ریفی و مارن ژیبسی
۵	Mur	مارن، مارن گچ‌دار، ماسه‌سنگ و کنگلومرا	۱۵	Ktzi	سنگ‌آهک اوریتولین‌دار
۶	Murmg	لایه‌های مارن گچ‌دار	۱۶	Pr	سنگ‌آهک
۷	Ebv	سنگ‌های بازالتی	۱۷	Ekgy	ژیبس
۸	pC-Cs	دولومیت و سنگ‌آهک ضخیم لایه با میان لایه‌های شیل	۱۸	COm	آهک تریلوبیت‌دار، دولومیت، ماسه‌سنگ و شیل
۹	Ek.a	شیل آهکی با میان لایه‌های توف	۱۹	pCk	شیل اسلیتی و ماسه‌سنگ کوارتزی
۱۰	Eat	توف آندزیتی			

کاربری اراضی: استفاده از زمین برای هدف‌های مختلف صورت می‌گیرد و تأثیر هر یک از این عوامل بر روی فرونشست می‌تواند متنوع باشد. کاربری‌های کشاورزی و شهری یکی از عوامل اصلی در افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی و بروز فرونشست است. همچنین وزن ناشی از این سازه‌های صنعتی سبب تراکم لایه‌های خاک و نشست

1 Conforti

2 Mokhtari & Abedian

سطح زمین می شود (ژو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ ندیری و همکاران، ۱۳۹۷). لذا نقشه کاربری اراضی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری ایران گرفته شد. همچنین کاربری کشاورزی، مناطق مسکونی و مناطق صنعتی از آن استخراج گردید.

عمق سنگ‌بستر: در منطقه‌ای که سنگ‌بستر در عمق کمی قرار دارد، به دلیل ضخامت کم آبرفت، حفر چاه امکان‌پذیر نیست. بر این اساس، آب‌های زیرزمینی به مناطقی منتقل می‌شوند که ضخامت بیشتری دارند که منجر به افزایش فرونشست و جابه‌جایی افقی لایه‌ها در آن منطقه می‌شود (پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، ۱۳۹۲). در این پژوهش، لایه عمیق سنگ‌بستر از نقشه جهانی عمق سنگ‌بستر (<https://data.isric.org/geonetwork/srv/api/records/f36117ea-9be5-4afd-bb7d-7a3e77bf392a>) تهیه گردید. مقادیر آن پیوسته و بین صفر تا ۲۳۱ متر است.

فاصله از جاده: محورهای ارتباطی با وجود عبور و مرورهای زیاد با ایجاد امواجی به طرفین و عمق زمین، به فروپاشی ذرات خاک در محل‌هایی که رطوبت کاهش پیدا کرده است ایجاد فرونشست زمین و فروچاله‌ها را تقویت می‌کند (عرب عامری^۲ و همکاران، ۲۰۲۱؛ حکیم^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). نقشه جاده‌ها از نقشه توپوگرافی رقومی شده ۱:۵۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه استخراج و سپس با استفاده از ابزار Distance در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه فاصله از جاده‌ها تهیه گردید.

تراکم چاه‌ها: میزان تراکم چاه‌ها و قنات‌ها با برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و میزان فرونشست ارتباط مستقیم دارد (جینه^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). در این پژوهش، موقعیت مکانی چاه‌ها به صورت X و Y از شرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) دریافت گردید و پس از ورود به نرم‌افزار ArcGIS، میزان تراکم چاه‌ها بر اساس تعداد حلقه چاه در کیلومتر مربع محاسبه گردید که مقادیر آن بین صفر تا ۲۲۳ حلقه چاه در کیلومتر مربع است.

تراکم زهکشی: میزان تراکم زهکشی با میزان فرونشست ارتباط مستقیم دارد (حکیم و همکاران، ۲۰۲۰). تراکم زهکشی یا به عبارتی نسبت طول آبراه‌ها به مساحت حوضه با استفاده از نقشه رقومی، ارتفاع و اکستنشن Archydro در نرم‌افزار ArcGIS محاسبه گردید که مقادیر آن بین ۰/۰۴ تا ۲/۱۴ کیلومتر در کیلومتر مربع است.

ضخامت آبخوان: از آنجایی که ضخامت آبرفت فاصله بین سطح زمین تا سنگ کف است و ضخامت آبخوان فاصله بین سطح ایستابی تا سنگ کف، لذا با کم کردن عمق سطح ایستابی از ضخامت آبرفت، ضخامت آبخوان را می‌توان برآورد نمود. به عبارتی، بخشی از ضخامت آبرفت را که اشباع از آب هست، می‌توان ضخامت آبخوان در

1 Zhou

2 Arabameri

3 Hakim

4 Jeanne

نظر گرفت. در این پژوهش، به دلیل موجود بودن نقشه نسبتاً دقیق ضخامت آبرفت و عمق سطح ایستابی، این روش مورد استفاده قرار گرفت. در نقشه پیوسته ضخامت آبخوان، مقادیر بین صفر تا ۲۸۵ متر است. عمق سطح آب زیرزمینی: میان عمق سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست ارتباط مستقیم وجود دارد. نقشه نقاط هم عمق پیژومترها از شرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) دریافت گردید و با استفاده از روش IDW، نقشه پیوسته عمق سطح آب زیرزمینی تهیه شد که مقادیر آن بین ۱۰ تا ۱۴۵ متر است.

۲-۲-۳- وزن‌دهی معیارها بر اساس روش BWM

روش بهترین-بدترین نخستین بار در سال ۲۰۱۵ توسط رضایی ارائه گردید. این روش بر مبنای مقایسات زوجی و بهره‌گیری از مدل برنامه‌ریزی خطی استوار شده است. در این روش بهترین و بدترین شاخص توسط تصمیم‌گیرنده مشخص می‌شود و مقایسه زوجی بین هر یک از این دو شاخص (بهترین و بدترین) و دیگر شاخص‌ها صورت می‌گیرد. همچنین در این روش، یک فرمول برای محاسبه نرخ ناسازگاری جهت بررسی اعتبار مقایسه‌ها در نظر گرفته شده است. مراحل این روش به شرح ذیل است (رضایی، ۲۰۱۶):

گام ۱: مجموعه زیرمعیارهای تصمیم‌گیری تعیین می‌شود.

گام ۲: بهترین و بدترین زیرمعیار با اعداد ۱ تا ۹ مشخص می‌شود.

گام ۳: ارجحیت بهترین معیار نسبت به دیگر معیارها به صورت $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$ مشخص می‌شود.

گام ۴: ارجحیت بدترین معیارها نسبت به دیگر معیارها به صورت $A_W = (a_{W1}, a_{W2}, \dots, a_{Wn})^T$ مشخص می‌شود.

می‌شود.

گام ۵: تشکیل بردار وزن بهینه به طوری که:

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \right\} \quad (1)$$

$$\sum_j^s \cdot W_j = 1;$$

$$W_j \geq 0. \text{ for all } j$$

همچنین، مسئله را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\min \xi$$

$$s \cdot t \cdot$$

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi. \text{ for all } j \quad (2)$$

$$\left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \leq \xi. \text{ for all } j \quad \sum_j W_j = 1; W_j \geq 0. \text{ for all } j$$

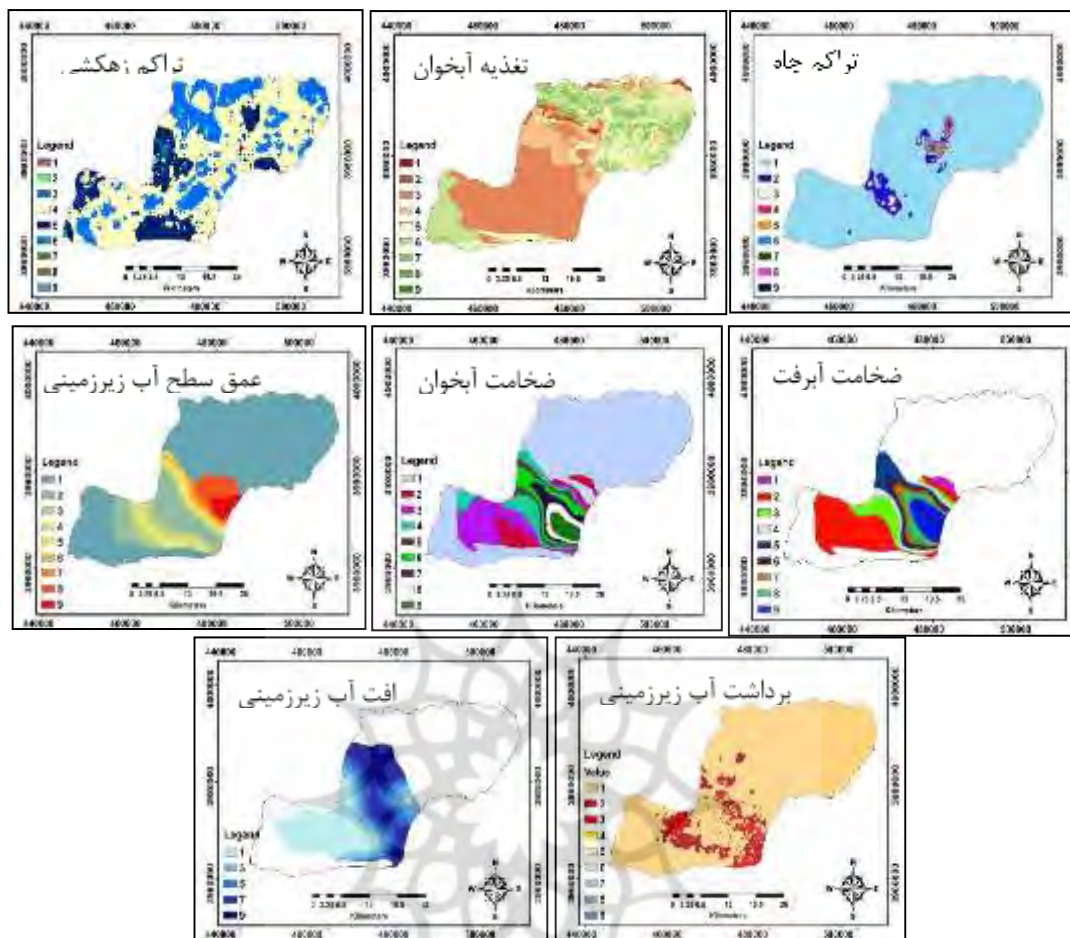
۲-۲-۴- اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) و مساحت سطح زیر این منحنی (AUC) استفاده شد. محور عمودی منحنی نشان‌دهنده درصد Sensitivity یا حساسیت است و محور افقی آن نشان‌دهنده Specificity یا ویژگی. مقدار AUC نشان‌دهنده احتمال این موضوع است که یک پیکسل انتخاب شده به‌طور تصادفی دارای پیش‌بینی صحیح باشد. بر این اساس، هر چه سطح زیرمنحنی به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده است (پرادهان^۱ و همکاران، ۲۰۱۴).

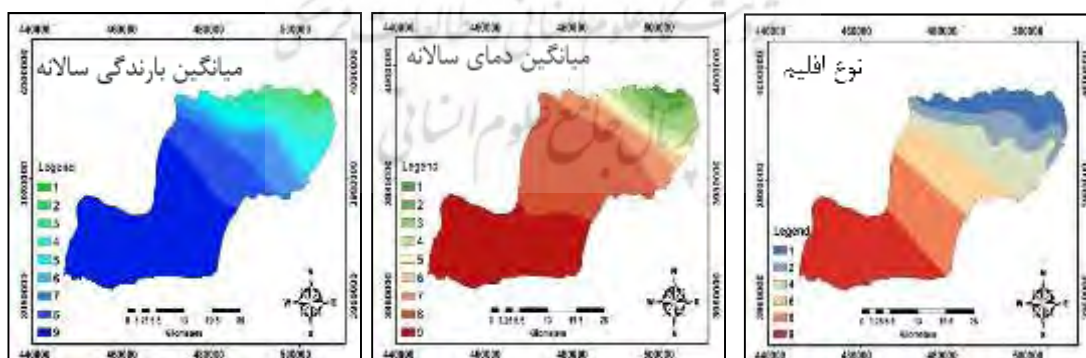
۳- بحث و نتایج

در این پژوهش، ۲ بعد فیزیکی - شیمیایی و اجتماعی - اقتصادی مشتمل بر ۵ معیار و ۱۹ زیرمعیار برای تعیین پهنه‌های مستعد فرونشست تدوین گردید و در ادامه بر اساس روش Z-Score استاندارد شدند. شکل‌های (۳) تا (۷) نقشه‌های هر یک از معیارها را در تعیین پهنه‌های مستعد فرونشست نشان می‌دهد.

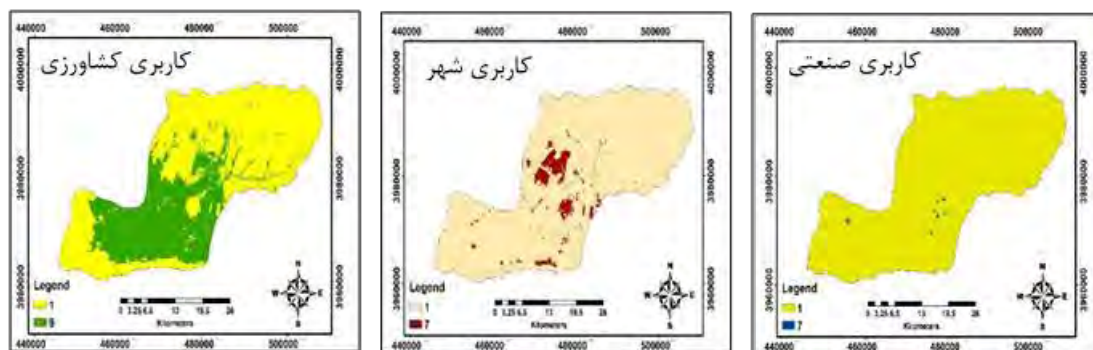




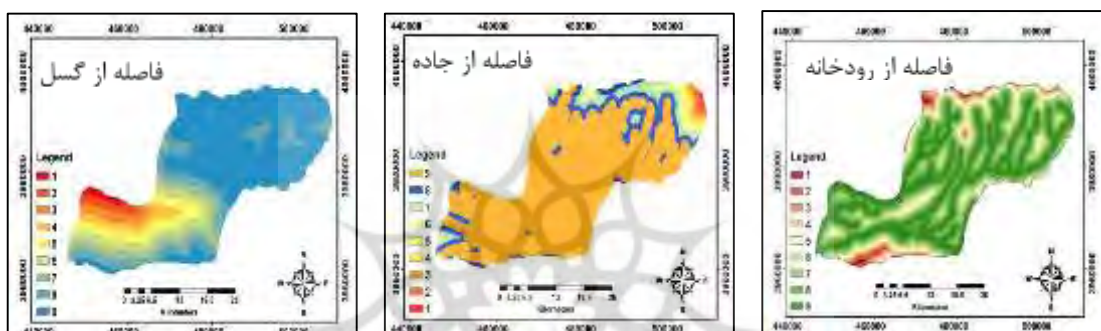
شکل ۳- طبقه‌بندی معیارهای هیدرولوژی در پهنه‌بندی فرونشست



شکل ۴- طبقه‌بندی معیارهای هوا و اقلیم در پهنه‌بندی فرونشست



شکل ۵- طبقه‌بندی معیارهای کاربری اراضی در پهنه‌بندی فرونشست



شکل ۶- طبقه‌بندی معیارهای حرایم در پهنه‌بندی فرونشست



شکل ۷- طبقه‌بندی معیارهای زمین‌شناسی در پهنه‌بندی فرونشست

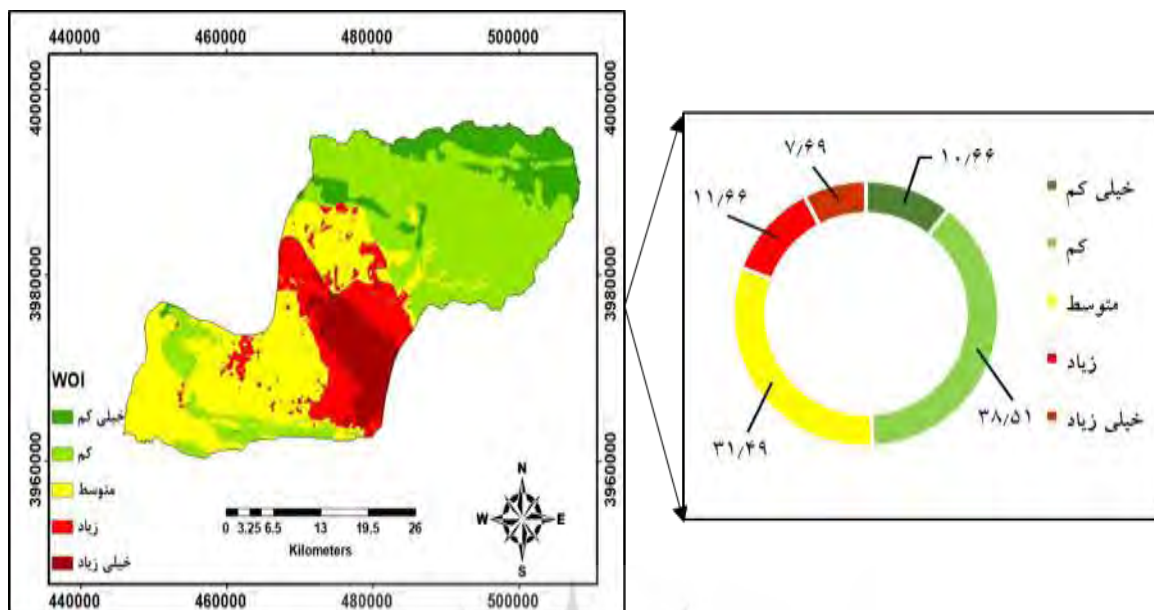
در ادامه، ۲۰ عدد پرسشنامه بین کارشناسان ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی توزیع و با استفاده از مدل BWM وزن معیارها و زیرمعیارها محاسبه گردید. برای این کار، در ابتدا بر اساس نظر کارشناسان مهم‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین زیرمعیار مشخص شد؛ در ادامه، پرسشنامه‌ها در دو بخش (بخش اول مقایسه بهترین زیرمعیار با سایر زیرمعیارها و بخش دوم مقایسه سایر زیرمعیارها با بدترین زیرمعیار) بین کارشناسان توزیع شدند تا بر اساس اصطلاحات زبانی آن

زیرمعیارها را با یکدیگر مقایسه کنند. در ادامه، پس از جمع‌آوری اطلاعات، اعداد مربوطه وارد نرم‌افزار LINGO شد تا بر اساس آن وزن زیرمعیارها محاسبه گردد. سپس با میانگین‌گیری از تمام خبرگان، ضریب اهمیت و یا وزن هر یک از معیارها مطابق **جدول (۳)** به‌دست آمد. از آنجایی که * ξ بیانگر میزان سازگاری یک مقایسه می‌باشد، این شاخص برای همه کارشناسان در این پژوهش نزدیک به صفر است که می‌توان نتیجه گرفت نتایج به‌دست آمده سازگاری بسیار خوب داشته است و قابل قبول بوده است.

جدول ۳- میزان اهمیت معیارهای مؤثر بر فرونشست دشت هشتگرد

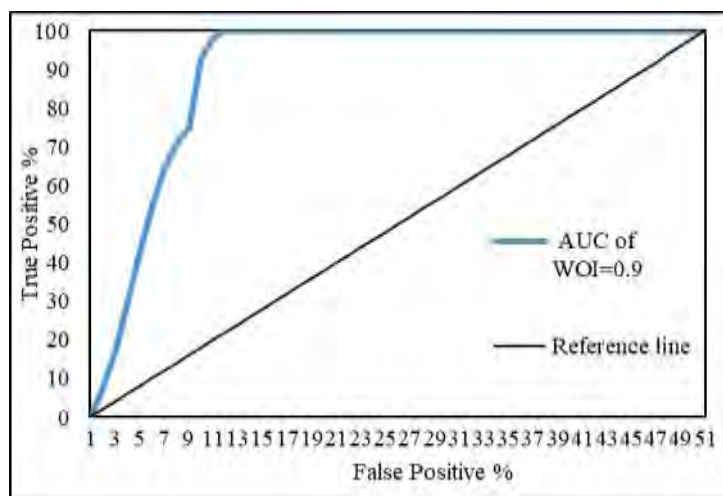
رتبه	وزن نهایی	وزن	زیرمعیار	معیار	بعد
۳	۰/۰۷۹	۰/۱۳۶	افت سطح آب زیرزمینی	هیدرولوژی ۰/۶۸	فیزیکی - شیمیایی ۰/۸۵۸
۱	۰/۲۱۹	۰/۳۷۵	برداشت آب زیرزمینی		
۸	۰/۰۴۸	۰/۰۸۲	ضخامت آبخوان		
۷	۰/۰۶	۰/۱۰۲	ضخامت آبرفت		
۱۰	۰/۰۳۴	۰/۰۵۸	تغذیه آبخوان		
۹	۰/۰۴	۰/۰۶۸	تراکم چاه‌ها		
۱۳	۰/۰۲۵	۰/۰۴۳	تراکم زهکشی		
۴	۰/۰۷۸	۰/۱۳۶	عمق آب زیرزمینی	زمین‌شناسی ۰/۲۲	
۲	۰/۱۵۷	۰/۸۳۳	نوع سازند زمین‌شناسی		
۱۱	۰/۰۳۲	۰/۱۶۷	عمق سنگ‌بستر	اقلیم ۰/۱	
۶	۰/۰۶۴	۰/۷۴۳	میزان بارش سالانه		
۱۷	۰/۰۰۹	۰/۱	متوسط دمای سالانه		
۱۵	۰/۰۱۳	۰/۱۵۷	نوع اقلیم سرزمین	کاربری اراضی ۰/۸	اجتماعی - اقتصادی ۰/۱۴۲
۱۲	۰/۰۲۶	۰/۲۳۳	کاربری کشاورزی		
۱۶	۰/۰۱۰	۰/۰۸۴	کاربری شهری		
۵	۰/۰۷۷	۰/۶۸۳	کاربری صنعتی		
۱۸	۰/۰۰۶	۰/۲۲۵	فاصله از رودخانه‌ها		
۱۹	۰/۰۰۴	۰/۱۲۵	فاصله از جاده‌ها		
۱۴	۰/۰۱۸	۰/۶۵	فاصله از گسل‌ها		

بر اساس روش BWM و با توجه به نظر کارشناسان، عوامل برداشت از آب زیرزمینی (۰/۲۱۹)، نوع سازند زمین‌شناسی (۰/۱۵۷)، افت سطح آب زیرزمینی (۰/۰۷۹) و عمق آب زیرزمینی (۰/۰۷۸) اهمیت بیشتری بر پتانسیل خطر وقوع فرونشست در دشت هشتگرد دارند. در این مرحله، لایه‌ها با استفاده از شاخص همپوشانی وزین جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی فرونشست ادغام شدند که در **شکل (۸)** نشان داده شده است.



شکل ۸- پهنه‌بندی پتانسیل فرونشست بر اساس روش شاخص هم‌پوشانی وزنی در دشت هشتگرد

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، ۱۰/۶۶ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به طبقه خیلی کم خطر، ۳۸/۵۱ درصد به طبقه خطر کم، ۳۱/۴۹ درصد به طبقه خطر متوسط، ۱۱/۶۶ درصد به طبقه پرخطر و در نهایت ۷/۶۹ درصد به طبقه خیلی پرخطر اختصاص یافته است. بر طبق نقشه خروجی، نیمه مرکزی دشت هشتگرد حساسیت بیشتری برای فرونشست دارد و امکان وقوع این مخاطره در این بخش حوضه بسیار زیاد می‌باشد. هم‌پوشانی این نقشه با نقشه معیارها نشان داد که بیشتر مناطق آسیب‌پذیر به فرونشست در نزدیکی گسل‌ها، مناطقی با بیشترین برداشت آب زیرزمینی، اراضی کشاورزی و در مخروط افکنه‌ها و تراس‌های آبرفتی مرتفع قدیمی اتفاق افتاده است. در نهایت، به منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل برای پهنه‌بندی خطر فرونشست، از منحنی ROC و سطح زیر منحنی AUC استفاده شد. بدین منظور نقاط برداشت شده و مقادیر عددی متناظر با آن‌ها در نقشه نهایی پتانسیل فرونشست وارد محیط نرم‌افزار SPSS شد و منحنی ROC محاسبه شد. سطح زیر منحنی برابر با ۰/۹ درصد است که عملکرد بسیار خوب مدل و کارایی آن برای پهنه‌بندی فرونشست را نشان می‌دهد.



شکل ۹- نمودار ارزیابی عملکرد مدل بر اساس منحنی‌های ROC

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای ارزیابی پتانسیل وقوع فرونشست در دشت هشتگرد از ۱۹ زیرمعیار تأثیرگذار در وقوع فرونشست، شامل میزان افت آب زیرزمینی، برداشت آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، ضخامت آبرفت، تغذیه آبخوان، تراکم چاه‌ها، تراکم زهکشی، عمق سطح آب زیرزمینی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق سنگ‌بستر، میزان بارش سالانه، متوسط دمای سالانه، نوع اقلیم سرزمین، کاربری کشاورزی، کاربری شهری، کاربری صنعتی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و فاصله از گسل استفاده و با مدل BWM وزن‌دهی شدند. بر اساس مدل BWM و با توجه به نظر کارشناسان، عوامل برداشت از آب زیرزمینی (۰/۲۱۹)، نوع سازند زمین‌شناسی (۰/۱۵۷)، افت سطح آب زیرزمینی (۰/۰۷۹) و عمق آب زیرزمینی (۰/۰۷۸) اهمیت بیشتری بر پتانسیل رخداد فرونشست در دشت هشتگرد دارند.

در نهایت، با تلفیق وزن معیارها و نقشه‌های استاندارد شده معیارها، نقشه نهایی پتانسیل مناطق مستعد وقوع فرونشست در دشت هشتگرد به دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده، مناطق مرکزی دشت هشتگرد ریسک بالایی نسبت به رخداد فرونشست زمین دارند. همچنین، بررسی مساحت هر یک از کلاس‌ها نشان داد که ۱۰/۶۶ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به طبقه خیلی کم‌خطر، ۳۸/۵۱ درصد به طبقه خطر کم، ۳۱/۴۹ درصد به طبقه خطر متوسط، ۱۱/۶۶ درصد به طبقه پرخطر و در نهایت ۷/۶۹ درصد به طبقه خیلی پرخطر اختصاص یافته است. بنابراین، بر اساس نتایج نقشه حساسیت تهیه شده فرونشست‌ها و نیز با توجه به تعیین میزان اهمیت عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، نتایج این پژوهش می‌تواند به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران در پیشگیری از این مخاطره محیطی و برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب و جلوگیری از برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی کمک شایانی نماید.

همچنین، نگارندگان بر این باورند که در تحقیقات آینده، استفاده از روش‌های دیگر همچون ماشین یادگیری و مقایسه نتایج آن با نتایج این پژوهش می‌تواند نقش مؤثری در افزایش دقت و کارایی نتایج داشته باشد. همچنین پایش و بررسی جامع وضعیت فرونشست منطقه با بهره‌گیری از آنالیز سری‌های زمانی تصاویر راداری می‌تواند کمک شایانی در طرح‌های آمایش سرزمین و طرح‌های آبخیزداری داشته باشد.

کتابنامه

- ابراهیمی، عطری؛ قاسمی، افشان؛ گنجائیان، حمید؛ ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *جغرافیا و روابط انسانی*. دوره ۲. شماره ۴. صص ۴۱-۲۹.
- https://www.gahr.ir/article_105079.html
- پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب؛ ۱۳۹۲. پیش‌بینی فرونشست ناشی از بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی ترکیبی و تکنیک تداخل‌سنجی در تصاویر ماهواره‌ای راداری. مؤسسه تحقیقات آب.
- <https://www.wri.ac.ir/research-institute-of-water-resources-studies-and-research/>
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور؛ ۱۳۸۶. گزارش آب زمین‌شناسی دشت هشتگرد- طرح فرونشست زمین در محدوده استان تهران (جلد دوم). شرکت توسعه علوم زمین. <https://www.ngdir.ir/down/443>
- شریفی‌کیا، محمد؛ افضلی، عباسعلی؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹۴. استخراج و ارزیابی اثرات پدیده‌های ژئومورفولوژیکی ناشی از فرونشست در دشت دامغان. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. سال چهارم. شماره ۲. صص ۷۴-۶۰.
- http://www.geomorphologyjournal.ir/article_77991.html
- شریفی‌کیا، محمد؛ مال امیری، نعمت؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹۲. سنجش آسیب‌پذیری سکونت‌گاه‌ها و تأسیسات از مخاطره مورفولوژیکی فرونشست در بخشی از جنوب شهر تهران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۲. شماره ۱. صص ۹۱-۱۰۶.
- <https://doi.org/10.22067/geo.v2i1.21020>
- شفیعی، نجمه؛ مختاری، لیلا گلی؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان؛ ۱۳۹۸. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. سال هشتم. شماره ۴. صص ۹۳-۱۱۱.
- <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.106424>
- عابدینی، موسی؛ آقایی، لیلا؛ اصغری، صیاد؛ ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه موردی: دشت اردبیل). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۱۰. شماره ۲. صص ۱۳۶-۱۵۵.
- <https://doi.org/10.22034/GMPJ.2021.215108.1214>
- محرمی، میثم؛ ارگانی، میثم؛ ۱۳۹۹. پتانسیل‌یابی مناطق مستعد زمین‌لغزش با استفاده از مدل FBWM (مطالعه موردی: شهر تبریز). *آمایش سرزمین*. دوره ۱۲. شماره ۲. صص ۵۹۳-۵۷۱.
- <https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.295295.670058>

مهرابی، علی؛ غضنفرپور، حسین؛ ۱۳۹۸. پایش روند تغییرات ارتفاعی سطح زمین در شهر کرمان و تعیین مناطق پرخطر با استفاده از تصاویر راداری ASAR و SENTINEL 1. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۸، شماره ۲. صص ۱۸۲-۱۶۷.
<https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.77132>

ندیری، عبدالله؛ طاهری، زینب؛ برزگری، قدرت؛ دیده‌بان، خلیل؛ ۱۳۹۷. ارائه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک. *تحقیقات منابع آب ایران*. دوره ۱۴، شماره ۲. صص ۱۹۴-۱۸۲
http://www.iwrr.ir/article_53792.html

نگهبان، سعید؛ پی سوزی، تینا؛ گنجائیان، حمید؛ نوروزی، میلاد؛ ۱۴۰۰. شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش و جابجایی عمودی با استفاده از تصاویر راداری (مطالعه موردی: محدوده شهری و حاشیه شهری لواسان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۱۰، شماره ۳. صص ۱۸-۱.
<https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.71728.1094>

Abidin H.Z, Andreas H, Gumilar I, Sidiq T.P, Gamal M., 2015. Environmental impacts of land subsidence in urban areas of Indonesia. In FIG Working Week (pp. 1-12). Sofia, Bulgaria: TS 3-Positioning and Measurement. <https://www.oicrf.org/-/fig-working-week-2015-from-the-wisdom-of-the-ages-to-the-challenges-of-modern-world>

Arabameri A, Lee, S, Rezaie F, Chandra Pal S, Asadi Nalivan O, Saha A, Chowdhuri I, Moayedhi H., 2021. Performance evaluation of GIS-based novel ensemble approaches for land subsidence susceptibility mapping. *Frontiers in Earth Science*, 9, 307. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.663678>

Chen, B., Gong, H., Lei, K., Li, J., Zhou, C., Gao, & M., et al., 2019. Land subsidence lagging quantification in the main exploration aquifer layers in Beijing plain, China. *Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75, 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.003>

Conforti M, Muto F, Rago V, Critelli S., 2014. Landslide inventory map of north-eastern Calabria (South Italy), *Maps*, 10(1), 90-102. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.852142>

Desir G, Gutiérrez F, Merino J, Carbonel D, Benito-Calvo A, Guerrero J, Fabregat I., 2018. Rapid subsidence in damaging sinkholes: measurement by high-precision leveling and the role of salt dissolution. *Geomorphology*, 503, 393-409. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.004>

Faunt C.C, Sneed M, Traum J, Brandt J.T., 2016. Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. *Hydrogeology*, 24(3), 675-684. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1339-x>

Galloway D.L, Jones D.R, Ingebritsen S.E., 1999. Land subsidence in the United States (Vol. 1182). US Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/pdf/circ1182_intro.pdf

Galloway, D. L., 2013. Subsidence induced by underground extraction. *Encyclopedia of Natural Hazards*, Springer, 979-985. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_336

Ghorbanzadeh O, Blaschke T, Aryal J, Gholaminia K., 2020. A new GIS-based technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system for land subsidence susceptibility mapping. *Spatial Science*, 65(3), 401-418. <https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1505564>

Hakim W.L, Achmad A.R, Lee C.W., 2020. Land subsidence susceptibility mapping in jakarta using functional and meta-ensemble machine learning algorithm based on time-series InSAR data. *Remote Sensing*, 12(21), 3627-3653. <https://doi.org/10.3390/rs12213627>

- Hu B, Zhou J, Wang J, Chen Z, Wang D, Xu S., 2009. Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China, *Environmental Earth Sciences*. 59(2), 269-276. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0024-6>
- Huang B, Shu L, Yang Y.S., 2012. Groundwater overexploitation causing land subsidence: hazard risk assessment using field observation and spatial modeling. *Water Resources Management*, 26(14), 4225-4239. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0141-y>
- Jeanne P, Farr T.G, Rutqvist J, Vasco D.W., 2019. Role of agricultural activity on land subsidence in the San Joaquin Valley, California. *Hydrology*, 569, 462-469. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.077>
- Modoni G, Darini G, Spacagna R.L, Saroli M, Russo G, Croce P., 2013. Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering Geology*, 167, 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.014>
- Mohammadi 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(2), 951-971. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03785-z>
- Mokhtari M, Abedian S., 2019. Spatial prediction of landslide susceptibility in Taleghan basin, Iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33(7), 1297-1325. <https://doi.org/10.1007/s00477-019-01696-w>
- Nadiri A.A, Taheri Z, Khatibi R, Barzegari G, Dideban K., 2018. Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT. *Science of the Total Environment*, 628, 1043-1057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.031>
- Navarro-Hernández M.I, Tomás R, Lopez-Sanchez J.M, Cárdenas-Tristán A, Mallorquí J.J., 2020. Spatial Analysis of Land Subsidence in the San Luis Potosi Valley Induced by Aquifer Overexploitation Using the Coherent Pixels Technique (CPT) and Sentinel-1 InSAR Observation. *Remote Sensing*, 12(22), 3822. <https://doi.org/10.3390/rs12223822>
- Pacheco J, Arzate J, Rojas E, Arroyo M, Yutsis V, Ochoa G., 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Quere ´taro valley, Mexico. *Engineering Geology*, 84(3), 143-160. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.12.003>
- Piscopo G., 2001. Groundwater vulnerability map explanatory Notes-Castlereagh Catchment. NSW Department of Land and Water Conservation, Australia. http://www.water.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0008/549377/
- Pradhan B, Abokharima M.H, Jebur M.N, Tehrany M.S., 2014. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. *Natural Hazards*, 73(2), 1019-1042. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1128-1> [quality_groundwater_castlereagh_map_notes.pdf](https://doi.org/10.1007/s11069-014-1128-1_quality_groundwater_castlereagh_map_notes.pdf)
- Rahmati O, Falah F, Naghibi S.A, Biggs T, Soltani M, Deo R.C, Artemi C, Mohammadi F, Bui D.T., 2019. Land subsidence modeling using tree-based machine learning algorithms. *Science of The Total Environment*, 672, 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.496>
- Rahnema H, Mirassi S., 2016. Study of land subsidence around the city of Shiraz, *Scientia Iranica*. *Scientia Iranica*, 23(3), 882-895. <https://doi.org/10.24200/sci.2016.2167>
- Ranjgar B, Razavi-Termeh S.V, Foroughnia F, Sadeghi-Niaraki A, Perissin D., 2021. Land subsidence susceptibility mapping using persistent scatterer SAR interferometry technique and optimized hybrid machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 13(7), 1326. <https://doi.org/10.3390/rs13071326>

- Rezaei J., 2016. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001>
- Sadeghfam S, Khatibi R, Dadashi S, Nadiri A.A., 2020. Transforming subsidence vulnerability indexing based on ALPRIFT into risk indexing using a new fuzzy-catastrophe scheme. *Environmental Impact Assessment Review*, 82, 106352. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106352>
- Shrestha P.K, Shakya N.M, Pandey V.P, Birkinshaw S.J, Shrestha S., 2017. Model-based estimation of land subsidence in Kathmandu Valley, Nepal. *Geomatics Natural Hazards Risk*, 8(2), 974–996. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1289985>
- Sopata P, Stoch T, Wójcik A, Mrocheń D., 2020. Land Surface Subsidence Due to Mining-Induced Tremors in the Upper Silesian Coal Basin (Poland)-Case Study. *Remote Sensing*, 12(23), 3923. <https://doi.org/10.3390/rs12233923>
- Tafreshi G.M, Nakhaei M, Lak R., 2019. Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *GeoJournal*, 86(38), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10129-8>
- Tosi L, Teatini P, Strozzi T., 2013. Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. *Scientific reports*, 3(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/srep02710>
- UNESCO., 2018. Proposal for the establishment of the land subsidence international initiative (LaSII), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris. <https://www.usgs.gov/media/files/proposal-creation-land-subsidence-international-initiative>
- Wang Y. Q, Wang Z. F, Cheng W. C., 2019. A review on land subsidence caused by groundwater withdrawal in Xi'an, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(4), 2851-2863. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1278-6>
- Zhang H, Yu J, Du C, Xia J, Wang X., 2019. Assessing risks from groundwater exploitation and utilization: Case study of the Shanghai megacity, China. *Water*, 11(9), 1775. <https://doi.org/10.3390/w11091775>
- Zheng Y.Y, Chen Y.L, Lin H.R, Huang S.Y, Yeh T.C, Wen J.C., 2017. A Simple Model to Describe the Relationship among Rainfall, Groundwater and Land Subsidence under a Heterogeneous Aquifer. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, (Vol. 2017, pp. H34A-08). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFM.H34A..08Z/abstract>
- Zhou C, Gong H, Chen B, Gao M, Cao Q, Cao J, Duan L, Junjie J, Shi, M., 2020. Land subsidence response to different land use types and water resource utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Remote Sensing*, 12(3), 457-479. <https://doi.org/10.3390/rs12030457>