



Evaluating and Zoning Subsidence Risk using MABAC and ANP Adaptive Algorithm (Case Study: Ardabil Plain)

Mousa Abedini^{a*}, Leila Aghayary^b, Sayyad Asghari Saraskanrood^c

^a Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

^b PhD in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

^c Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 14 January 2022

Revised: 22 May 2022

Accepted: 25 June 2022

Abstract

One of the dangers facing plains is subsidence. Land subsidence due to various reasons, such as over-harvesting of underground water sources and climate changes, has caused many problems in agricultural lands, roads, and power and energy transmission lines. Therefore, it is important to deal with the causes and influencing factors to control the risks. Ardabil plain is also one of the areas prone to subsidence due to climate changes and the decrease of underground water in recent years. The aim of the present research is the zoning subsidence risk in this plain. First, the factors influencing subsidence in the Ardabil plain (slope, land use, lithology, distance from the fault, distance from the waterway, drop in water level, distance from the city and the village) were identified. Then the layers of data were applied in the geographic information system. In the next stage, the weighting of the investigated factors was done using ANP method and in the Super Decision software, and the final analysis and modeling were done using the MABAC method as one of the multi-criteria decision making methods. Finally, the resulting map was classified into five categories from very low risk to very high risk. The results showed that such factors as water level drop, distance from the river and lithology have the highest weighting factor. Moreover, 244.29 and 370.59 square kilometers, respectively, of the area of this plain, are in very dangerous and dangerous classes. Finally, due to the high potential of Ardabil plain in terms of subsidence, protective and management measures should be taken into consideration by relevant authorities and institutions.

Keywords: Hazards, Subsidence Phenomenon, MCDM, Ardabil Plain

*. Corresponding author: Mousa Abedini E-mail: abedini@uma.ac.ir Tel: + 98914355226

How to cite this Article: Abedini, M., Aghayary, L., & Asghari Saraskanrood, S., (2023). Evaluating and zoning subsidence risk using MABAC and ANP adaptive algorithm (Case study: Ardabil Plain), *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 43-68.

DOI:10.22067/geoeh.2022.74202.1143



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.2022.74202.1143> 


جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۶۸-۴۳

مقاله پژوهشی

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

ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP

(مطالعه موردی: دشت اردبیل)

 موسی عابدینی^۱ - استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
لیلا آقایی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
صیاد اصغری سراسکانرود - استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۴

چکیده

یکی از مخاطرات پیشروی دشت‌های کشور، مخاطره فرونشست است. پدیده فرونشست زمین به دلایل مختلف از جمله برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی و تغییرات جوی سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان در زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی شده است؛ از این رو پرداختن به علل و عوامل تأثیرگذار جهت کنترل و مدیریت خطر دارای اهمیت است. دشت اردبیل نیز به خاطر تغییرات اقلیمی و افت سطح آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر یکی از مناطق مستعد جهت مخاطره فرونشست است. هدف تحقیق حاضر، پهنه‌بندی خطر فرونشست در این دشت است. در این مطالعه ابتدا، عوامل مؤثر جهت ایجاد فرونشست در دشت اردبیل (شیب، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از آبراه، افت سطح آب، فاصله از شهر و روستا)، شناسایی شدند و سپس نسبت به تهیه لایه‌های اطلاعاتی در سامانه اطلاعات جغرافیایی اقدام گردید. در مرحله بعد وزن‌دهی عوامل موردبررسی، با استفاده از روش ANP و در محیط نرم‌افزار Super Decision انجام گردید و تحلیل و مدل‌سازی نهایی با استفاده از

Email: abedini@uma.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۳۵۵۵۲۲۶

نحوه ارجاع به این مقاله:

عابدینی، موسی؛ آقایی، لیلا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد؛ ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی

MABAC و ANP (مطالعه موردی: دشت اردبیل). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۴). صص ۶۸-۴۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74202.1143>

روش MABAC به عنوان یکی از روش های تصمیم گیری چندمعیاره، انجام شد. در نهایت، نقشه حاصله در پنج رده با خطر بسیار کم تا خطر بسیار زیاد طبقه بندی گردید. با توجه به نتایج مطالعه، عوامل افت سطح آب، فاصله از رودخانه و لیتولوژی بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند. همچنین، نتایج مطالعه نشان داد؛ به ترتیب ۲۹/۲۴۴ و ۵۹/۳۷۰ کیلومتر مربع از مساحت این دشت، در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارند. در نهایت می توان اظهار داشت، نظر به توان بالای دشت اردبیل، از لحاظ رخداد فرونشست، بایستی اقدامات حفاظتی، مدیریتی در سطح دشت اردبیل مورد توجه مسئولان و دستگاه های ذیربط قرار گیرد.

کلیدواژه ها: مخاطرات، پدیده فرونشست، MCDM، دشت اردبیل.

۱- مقدمه

چشم انداز سطح زمین به عنوان سیستمی پیچیده حاصل تعامل فاکتورهایی نظیر فرآیندهای جغرافیایی، اقلیمی، زمانی و فعالیت های انسانی است. رشد کالبدی، بدون رعایت اصول برنامه ریزی شهری و ساخت وسازهایی بدون در نظر گرفتن پتانسیل مخاطرات موجود در پهنه های در معرض مخاطرات طبیعی، آسیب پذیری و خسارت ها در محدوده های مورد نظر را تشدید می کند. عواملی که با تغییر در چگونگی ساختار و کارکرد توپوگرافی طبیعی و ریز اقلیم، به ویژه در محیط های انسان ساخت، زمینه ساز ایجاد مخاطراتی نظیر زمین لغزش، سیلاب شهری، زمین لرزه و فرونشست می گردد (فنی و همکاران، ۱۳۹۶). براساس تعریف سازمان زمین شناسی ایالت متحده، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست روبه پائین سطح زمین است که می تواند دارای حرکت قائم رو به پائین سطح زمین و کمی افقی باشد (عابدینی، ۱۳۹۶). پدیده فرونشست زمین به دلایل مختلف از جمله برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی و تغییرات جوی سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان در زمین های کشاورزی، جاده ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی می شود (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱). فرونشست از جمله مخاطرات زمین شناسی است که از لحاظ سرعت شکل گیری، به دو دسته سریع و تدریجی تقسیم می گردد. حالت تدریجی به دلیل تلفات انسانی کم آن در مقایسه با دیگر پدیده های طبیعی مانند زلزله، لغزش و سیلاب کمتر مورد توجه قرار می گیرد (مدنی و همکاران، ۱۳۹۶).

اما فرونشست در حالت سریع باعث آسیب به سازه ها و تلفات انسانی می گردد. فرونشست زمین در سال های اخیر به مشکلی جهانی تبدیل شده است. چراکه در اکثر کشورها در حال وقوع است. فرونشست سبب تخریب کانال های آبیاری، شکست خطوط لوله های آب و نفت، خطوط انتقال نیرو و تخریب سازه ها و تشدید فرایند زمین لغزه و سیلاب ها می شود (محمودی و همکاران، ۱۳۹۲). فرایندهای طبیعی مانند حرکات تکتونیکی، فوران آتشفشان، انحلال سنگ ها و کارستی شدن، تراکم رسوبات و ذوب زمین های یخ بسته معمولاً سبب فرونشست زمین در ناحیه

وسیع می‌گردند (ژویی^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). به‌طور کلی فرونشست متأثر از فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های آب زیرزمینی و پارامترهای زمین‌شناسی است که در صورت عدم شناخت این پدیده سبب آسیب جدی به زیرساخت‌های اقتصادی می‌گردد (گالووی^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). پژوهشگران رابطه بین توسعه شهری و فرونشست زمین را رابطه‌ای دو جانبه می‌دانند که هردو بر هم تأثیر گذاشته و تأثیر می‌پذیرند. به گفته آن‌ها تمدن شهرها به جهت رشد سریع در توسعه شهری در بخش‌های مختلف صنعت، تجارت و حمل‌ونقل اثرات زیست‌محیطی منفی از خود بر جا می‌گذارند؛ مانند: تغییر در کاربری اراضی کشاورزی به مسکونی، مصرف بی‌رویه منابع آب‌های زیرزمینی جهت گسترش فعالیت‌های صنعتی و افزایش جمعیت این اثرات منفی در نهایت منجر به بروز پدیده فرونشست می‌شود و همین پدیده می‌تواند برنامه و فرایند توسعه شهری را متأثر سازد (متتظریون و همکاران، ۱۳۹۸).

به‌منظور شناسایی و کاهش پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست نیاز به یک سیستم پایش فرونشست بیش‌ازپیش در کشور و دشت اردبیل احساس می‌شود. اولین گام در پایش فرونشست اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی ناشی از آن در سطح زمین است. با علم به میزان نرخ فرونشست و همچنین پهنه و گستره مناطق تحت تأثیر، نه تنها قادر خواهیم بود، میزان پیشرفت این پدیده را در یک منطقه شناسایی کنیم و از پیشرفت بیشتر آن جلوگیری نماییم. بلکه می‌توانیم اطلاعات باارزشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی و سفره آب زیرزمینی به دست آوریم.

امروزه؛ از یک سو، سیستم اطلاعات جغرافیایی، ابزاری مؤثر برای سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری تعاملی برای عملیات مدیریت ریسک هستند (بوخیر^۳ و همکاران، ۲۰۰۶) و در سال‌های اخیر، جهت مطالعه فرونشست مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرند. از سوی دیگر، برای کشف طیف وسیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، از روش MCDM استفاده می‌شود (آهر^۴ و همکاران، ۲۰۱۳). در این روش‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مدل، از معیارهای مختلفی برای افزایش صحت تصمیمات استفاده می‌شود (جورجیو و همکاران^۵، ۲۰۱۵؛ عرب عامری و همکاران، ۲۰۱۸). لذا می‌توان گفت، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند باعث تسریع در روند برنامه‌ریزی در تشخیص موارد بحرانی و اضطراری شده و منجر به صدور نتایج مناسبی گردد. مطالعات متعددی در نقاط مختلف جهان انجام شده و توانایی تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، برای ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست نشان داده است. تاکنون مطالعات فراوانی پیرامون پهنه‌بندی مخاطرات از جمله فرونشست در ایران و سایر کشورها انجام شده است که به برخی از آن‌ها

1 zhu et all

2 Galloway at all

3 Bukheir et all

4 Aher et all

5 Georgiou et all

اشاره می‌شود. استیفن^۱ (۲۰۱۶)، به بررسی علل فرونشست و عوامل تشدیدکننده و خسارات ناشی از فرونشست را بررسی کرده و مهم‌ترین علت فرونشست را تخلیه بیش از حد آب‌های زیرزمینی و انحلال سنگ‌های کربناته اعلام کرد. کویی انجویین^۲ (۲۰۱۶)، در کتاب علل فرونشست زمین در شهر هوشی مین به مطالعه این پدیده پرداخته و توصیه‌های مناسبی در جهت مدیریت آن در سطح شهر بیان کرده است. گامبولاتی^۳ و همکاران (۲۰۰۶)، به مطالعه تأثیر فعالیت‌های انسانی بر میزان فرونشست زمین در مناطق مسکونی پرداختند و طبق بررسی‌های انجام شده برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و تجمع سازه‌ها را مهم‌ترین علت فرونشست در مناطق مسکونی بیان کردند. هوانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۶)، به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS پرداختند. بررسی‌ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی‌متری است و این نشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد. کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، اقدام به بررسی ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS کرده و نتیجه کارشان نشان داده که بین وضعیت توپوگرافی، ضخامت سازند و برداشت آب ارتباط تنگاتنگی وجود دارد و بیشترین میزان فرونشست در مناطق با برداشت زیاد، آبرفت‌های ضخیم، و مناطق پست دشت مشاهده می‌شود. عابدینی و همکاران (۱۳۹۵) در مورد فرونشست دشت روانسرا-سنجایی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی کار کرده‌اند و نتایج نشان داده که ارتباط و همبستگی قوی میان عمق رسوبات ریز دانه چاه‌ها و احتمال فرونشست زیاد آبی وجود ندارد به طوری که حداکثر عمق رسوبات ریز دانه در نواحی مستعد فرونشینی با احتمال خطر بالا، حدود ۹۱۲ متر است این در حالی است که در برخی از نقاط آبخوان که استعداد کمتری برای فرونشست دارند عمق رسوبات ریز دانه بسیار بیشتر و حدود ۲۲۲۰ متر است.

شادفر و همکاران (۱۳۹۴)، در مقاله‌ای به پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش AHP پرداختند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که فاکتور برداشت بی‌رویه با ضریب ۴۸ درصد در درجه اول و عامل سنگ‌شناسی با ضریب ۲۴ درصد در درجه دوم اهمیت در ایجاد فرونشست منطقه است. همچنین نتایج نشان داد که ۵۵ درصد از مساحت منطقه، در پهنه‌بندی با خطر نسبتاً زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. شایان (۱۳۹۵)، به پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان پرداختند. جهت پهنه‌بندی از ۵ لایه ارتفاع، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی شبکه‌های زهکشی و شیب استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات ناهمسان در داده‌های مورفومتری شبکه زهکشی مهم‌ترین فاکتور مؤثر در تشدید افت آب‌های زیرزمینی و وقوع فرونشست در منطقه بوده و عوامل لیتولوژیکی و انسانی به‌تنهایی نقشی ندارند. فنی و همکاران (۱۳۹۶)، به پهنه‌بندی و تحلیل فضایی حساسیت مخاطرات چهارگانه

1 Stephen

2 coein enjoein

3 Gambolati

4 hoang at all

محیطی زمین‌لغزش، سیل، زلزله و فرونشست در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران پرداختند. روش مطالعه در این مقاله، روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP است و از نقشه‌های بارندگی، شکل شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی و زمین‌شناسی استفاده کرده‌اند و نقشه حساسیت نهایی در قالب ۵ کلاس حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی و به صورت نقشه و جدول استخراج و ارائه شده‌اند. **عالی پور و همکاران (۱۳۹۶)**، به پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی دشت اردبیل پرداختند و اقدام به تهیه نقشه احتمال فرونشست زمین و تعیین مناطق دارای ریسک پرداختند. لایه‌های اطلاعاتی شامل ۵ لایه زمین‌شناسی، فاصله از گسل، افت سطح آب زیرزمینی، شیب و ضخامت آبرفت به عنوان معیارهای مؤثر مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج نشان داد که ۱۳ درصد منطقه دارای ریسک خیلی بالا است و حدود ۶۷/۵ درصد مناطق جنوبی در بخش ریسک‌های خیلی بالای فرونشست، به دلیل استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی است. **بهیاری و همکاران (۱۳۹۶)**، به ارزیابی تأثیر ساختارهای فعال بر خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمتغیره پرداختند. در این مطالعه از روش AHP به منظور تجزیه و تحلیل خطر فرونشست در منطقه مورد مطالعه با استفاده از لایه‌های مطالعاتی ارتفاع، شیب، آبراه‌ها و زمین‌شناسی، نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست در منطقه تهیه گردید. این نقشه نشان می‌دهد که خطر فرونشست در بخش جنوبی منطقه نسبت به سایر مناطق بیشتر است. **کوه بنانی و همکاران (۱۳۹۸)**، به پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری در دشت کاشمر و خلیل‌آباد با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ مربوط به سال‌های ۹۴ تا ۹۷ پرداختند. نتایج نشان داد، این منطقه در بیش‌ترین حالت ۱۷ سانتی‌متر در سال فرونشست دارد و بیشتر در حومه جنوب غرب شهر کاشمر و مناطق غربی دشت خلیل‌آباد متمرکز است. **منتظریون و همکاران (۱۳۹۸)**، مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی خطر فرونشست زمین با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان‌های تهران و البرز با به‌کارگیری روش AHP تحلیل نمودند و نتایج نشان می‌دهد که مناطق وسیعی در استان تهران از جمله غرب و جنوب غربی و همچنین دشت ورامین، شهریار و کرج از مناطق مستعد وقوع فرونشست است. **شفیعی و همکاران (۱۳۹۹)**، به بررسی فرونشست دشت آبخوان نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند و جهت بررسی وضعیت افت سطح آب‌های زیرزمینی از روش درون‌یابی IDW استفاده کرده‌اند و نقشه‌های حاصل از فرونشست نشان می‌دهد که نرخ نشست در هر سال به‌طور میانگین ۴ سانتی‌متر و طی بازه زمانی ۴ ساله ۱۶ سانتی‌متر است. **ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)**، به پایش میزان فرونشست محدوده شهری دشت پاکدشت با روش تداخل‌سنجی پرداختند. نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری محدوده مطالعاتی در طی بازه زمانی یک‌ساله بین ۱۵ تا ۸۵ میلی‌متر فرونشست را نشان می‌دهد و مهم‌ترین و مؤثرترین عامل در فرونشست را هم‌افت سطح آب‌های زیرزمینی عنوان کرده‌اند. **شاه کرمی و همکاران (۱۳۹۹)**، مناطق فرونشست در اثر اضافه برداشت آب

زیرزمینی در دشت اراک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع هستند که نواحی مرزی و حاشیه‌ای دشت اراک در معرض افت بیش‌تر آب قرار دارند و تمرکز رسوبات ریزدانه رسی در قسمت‌های غربی به مراتب بیشتر از نواحی دیگر است. در نتیجه احتمال می‌رود این نواحی در معرض خطر فرونشست بیشتری باشند. **زارعی و همکاران (۱۳۹۹)**، به تعیین رابطه فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی با دو روش تداخل‌سنجی راداری و ایستگاه سایت gps دشت سلماس پرداختند و نتایج نشان داد که به ازای یک متر افت سطح آب زیرزمینی، ۰/۰۷۸ متر سطح زمین در دشت نشست می‌کند. **جوادی (۱۴۰۰)**، در رساله خود به برآورد و تحلیل میزان فرونشست دشت همدان- بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS در طی بازه زمانی ۵ ساله و میزان فرونشست این دشت را ۵۶ میلی‌متر به‌صورت سالانه برآورد کرده است و بیش‌ترین میزان فرونشست مربوط به مناطق دارای افت منابع آب زیرزمینی است. **فرزین‌کیا و همکاران (۱۴۰۰)**، به پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جوبین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای فازی پرداختند در این تحقیق از روش ANP و فازی، فرونشست به‌صورت کلاس‌بندی برای نشان دادن ویژگی‌های مناطق بحرانی فرونشست و اولویت‌بندی مناطق مختلف از نظر استعداد برای وقوع پدیده فرونشست به دست آمد و نتایج بیانگر این است که ۵۶ درصد قسمت مرکزی دشت جوبین با خطر زیاد تا خیلی زیاد به حساب می‌آیند.

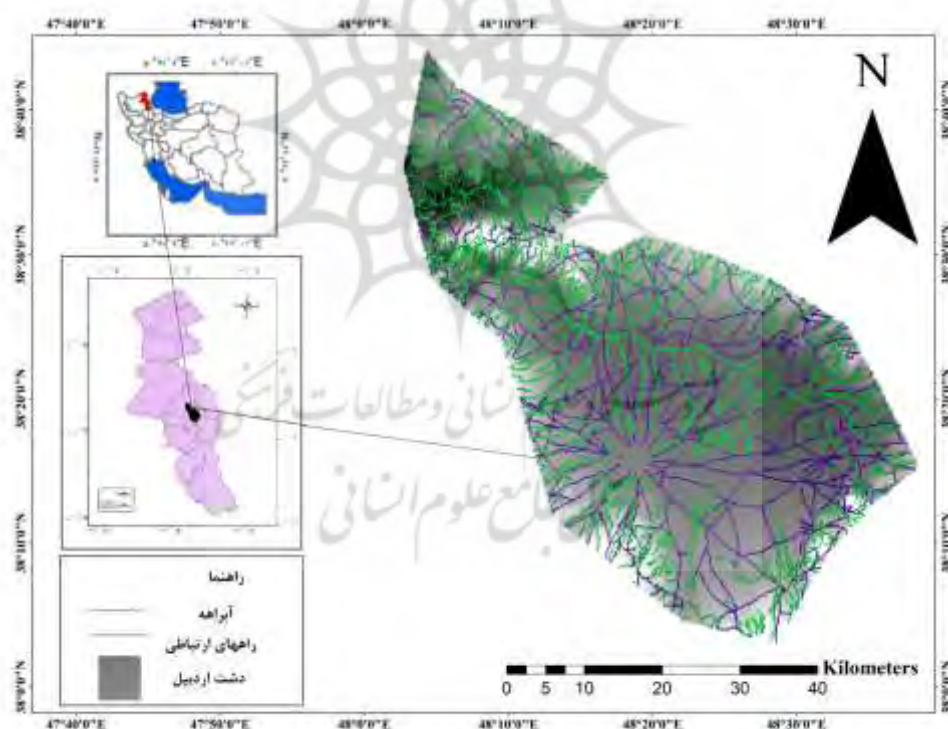
هرچند که تحقیقات معدودی در مورد دشت اردبیل انجام شده، ولی موضوع آن‌ها متفاوت بوده است. **عابدینی (۱۳۹۲)**، در مورد علل فرونشست دشت اردبیل کار کرده، و مهم‌ترین علل آن را برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های تکتونیک حاصل از گسل‌های حواشی دشت و سنگینی ناشی از انباشت آبرفت‌ها عنوان کرده است

با توجه به منابع بررسی شده محققان مختلف این تکنیک را به‌عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون فرونشست مطرح کرده است. روش MABAC، که براساس رویکرد برنامه‌ریزی مطلوب و بهینه‌سازی چندمعیاره پایه‌ریزی شده است، به‌عنوان روش تصمیم‌گیری چند معیاره، در تلفیق با فرایند تحلیل شبکه، به‌منظور پهنه‌بندی پتانسیل وقوع فرونشست دشت اردبیل استفاده شد. طبق بررسی منابع منتشر شده، تاکنون در دشت اردبیل با این روش و داده‌های ورودی، پژوهشی ارائه نشده است لذا جهت برآورد دقیق‌تر میزان فرونشست و عوامل تأثیرگذار بر آن لزوم و خلأ انجام تحقیق با این روش کاملاً احساس می‌شود. لذا اهداف تحقیق حاضر، بررسی فرونشست دشت اردبیل با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، پهنه‌بندی فرونشست، اندازه‌گیری معیارهای مؤثر بر فرونشست و بررسی مؤثرترین عوامل در فرونشست دشت اردبیل است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت اردبیل در شمال غرب ایران در قسمت شرقی فلات آذربایجان و از نظر تقسیمات کشوری در مرکز استان اردبیل واقع شده است. در بررسی زمین‌شناسی، دشت اردبیل با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول خاوری و ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی قرار دارد. زمین‌های حاشیه دشت از اطراف به سمت دشت شیب دارند. ارتفاع متوسط اراضی کشاورزی حدود ۱۳۶۰ متر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد. وسعت آن حدود ۸۲۰ کیلومتر مربع است و جزئی از حوضه آبخیز رودخانه قره‌سو به شمار می‌رود. دشت اردبیل متشکل از ۸۸ واحد روستایی ده واحد دهستان و ۲ واحد شهری اردبیل و آبی بیگلو است. شهر اردبیل مرکز استان اردبیل در غرب این دشت واقع شده است. در محدوده دشت اردبیل تعداد ۲۲۴۳ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق، ۲۰ دهنه چشمه و ۱۸ رشته قنات وجود دارد که به مصارف کشاورزی اختصاص دارند (رستمزاده و همکاران، ۱۳۹۴).



شکل ۱- نقشه موقعیت دشت اردبیل

۲-۲- داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده

در راستای انجام این پژوهش از داده و تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای متعددی استفاده شده است که مشتمل بر موارد زیر خواهد بود:

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق آن تحلیلی مبتنی بر آنالیز داده‌ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از فنون تحلیل چندمعیاره است. جهت پردازش تصاویر و تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز از نرم‌افزارهای Arc GIS، ENVI، Ecognition، Excel، بهره‌گیری شده است. جهت بررسی خطر فرونشست، در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا باید مؤلفه‌های تأثیرگذار مشخص شده و بر مبنای آن‌ها داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز گردآوری و طبقه‌بندی شوند. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر (شامل: شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، افت سطح آب و فاصله از شهر و روستا)، با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی گردید. در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه اطلاعاتی شبکه آبراهه، با استفاده از نقشه رودخانه‌های استان اردبیل، تهیه گردید. لایه‌های شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، دانلود شده از سایت (USGS)، تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها، با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی اردبیل؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. برای استخراج کاربری اراضی محدودۀ مورد مطالعه، از تصاویر سنجنده لندست هشت (سنجنده OLI)، به شماره گذر ۱۶۷ و ردیف ۳۴، تاریخ ۲۰۲۰/۰۶/۲۰، اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov)، استفاده شده است (جدول ۱).

تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال: تصویر ماهواره‌ای اپتیکال در این تحقیق به منظور استخراج نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۰ استفاده شد. مشخصات تصاویر لندست اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov)، در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی از نرم‌افزار ENVI5.3 و به منظور استخراج نقشه‌های مربوطه از نرم‌افزار ARCGIS10.5 استفاده شد. برای طبقه‌بندی کاربری اراضی از روش طبقه‌بندی شیء‌گرا در نرم‌افزار ecognition developer64 استفاده شد. همچنین به منظور به دست آوردن صحت طبقه‌بندی از Google Earth، استفاده شد.

جدول ۱- اطلاعات تصاویر سنجنده لندست ۸

SCENE-CENTER-TIME	SUN-AZIMUTH	ROW	PATH	Sansor name	Year
۰۷:۲۶:۲۷	۱۴۵,۵۰۲۴۸۳۹۷	۳۴	۱۶۷	Landsat 8	۲۰۲۰

در روش طبقه‌بندی شیء‌گرا، اطلاعات طیفی با اطلاعات مکانی ادغام گردیده و پیکسل‌ها براساس شکل، بافت و تن خاکستری در سطح تصویر با مقیاس مشخص، قطعه‌بندی شده و طبقه‌بندی تصویر براساس این قطعه‌ها انجام

می‌شود. در قطعه‌بندی پیکسل‌ها توسط الگوریتم‌های مختلف، با نسبت‌های مختلف طیفی و شکلی طبقه‌بندی و براساس ویژگی‌های طیفی و فضایی در قالب اشیا گوناگون دسته‌بندی شده‌اند. طی این فرآیند شی‌های تصویری متناسب با همگن بودن یا ناهمگن بودن براساس پارامترهای مقیاس، رنگ، شکل، ضریب نرمی و شکل فشردگی ایجاد شد (فیضی‌زاده و هیلالی، ۱۳۸۹). با آزمون و خطا بهترین اندازه که نشان‌دهنده اشیا با ابعاد مختلف می‌باشند تعیین شد. در این پژوهش تصویر قطعه‌بندی شده، دارای مقیاس ۴۵، شکل ۰/۵، ضریب فشردگی ۰/۵، انجام گردید. بعد از مشخص کردن تعداد و کلاس‌های موردنظر، در طبقه‌بندی تعیین شی‌های نمونه‌های آموزشی انجام و در نرم‌افزار بر سطح تصویر اعمال گردید. سپس طبقه‌بندی با استفاده از نزدیک‌ترین همسایه و روش درخت تصمیم‌گیری صورت گرفت. لازمه استفاده از هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از صحت و درستی آن است. دقت طبقه‌بندی در سال ۲۰۲۰ با صحت کلی ۹۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۶ است.

فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

روش (ANP) شکل توسعه یافته‌ای از روش (AHP)، است که قادر است همبستگی و بازخوردهای موجود بین عناصر در یک تصمیم‌گیری را مدل‌سازی نموده و تمامی تأثیرات درونی اجزای مؤثر در تصمیم‌گیری را منظور و وارد محاسبات نماید. در مدل AHP، تنها معیارها با معیار بالایی خود ارتباط داشتند؛ یعنی معیارها به هدف‌ها، زیرمعیارها به معیارها و گزینه‌ها هم به زیرمعیارها وابسته بودند، حتی خود معیارها هم به همدیگر وابسته نبودند. ولی در مدل ANP، نه تنها خوشه‌ها بر عناصر و عناصر بر گزینه، گزینه بر عناصر تأثیر می‌گذارند، بلکه حتی عناصر بر خودشان و بر دیگر خوشه‌ها نیز اثرگذارند. به‌طورکلی، روش (ANP)، دارای مراحل نیز هست که شامل، ۱- تعیین معیارها و شاخص‌ها ۲- تعیین روابط و ارتباطات بین عناصر و خوشه‌ها: در این گام، مسأله تصمیم‌گیری به ساختار شبکه‌ای تجزیه می‌گردد. ۳- مقایسات زوجی بین عناصر و خوشه‌ها: ماتریس‌های مقایسات زوجی مشابه با روش (AHP) است و زوج‌های عناصر تصمیم‌گیری در هر خوشه به نسبت اهمیتشان در جهت شرط‌های کنترلی آن‌ها مقایسه می‌شوند. ۴- تشکیل سوپرماتریس‌ها: الف- تشکیل سوپرماتریس اولیه یا غیر وزنی ب- تشکیل سوپرماتریس وزنی ج- تشکیل سوپرماتریس حدی: سوپرماتریس وزنی، به توان حدی می‌رسد تا عناصر ماتریس همگرا شده و مقادیر سطری آن با هم برابر شوند. ۵- نتایج ماتریس خوشه‌ها. ۶- نتیجه نهایی عناصر: ضرایب سوپرماتریس در ضرایب ماتریس خوشه‌ها نرمال شده و درنهایت، نتیجه نهایی عناصر و اولویت آن‌ها مشخص می‌گردد (فرجی سبک‌بار و همکاران، ۱۳۸۹).

گام‌های روش ماباک (MABAC)

۱- تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش. ۲- تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم در این روش به‌صورت معیار-گزینه است؛ یعنی یک ماتریس که ستون‌های آن را معیارهای مساله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر

سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است. ۳- در این مرحله نسبت به استانداردسازی و یا به عبارت دیگر بی‌مقیاس نمودن معیارها، اقدام می‌گردد. در این پژوهش، از روش فازی و تابع عضویت خطی (Linear) و سیگموئیدال (Sigmoidal)، به منظور استانداردسازی استفاده شده است. در مجموعه‌های فازی، مقدار یک به عنوان بیشترین ارزش به حداکثر عضویت و صفر به عنوان کمترین ارزش، به حداقل عضویت لحاظ می‌گردد (حسینی و همکاران، ۲۰۱۹).

۴- وزن‌دار کردن ماتریس نرمال: در این گام با استفاده از رابطه زیر، ماتریس نرمال را وزن‌دار می‌کنیم (رابطه ۱). در مطالعه حاضر جهت وزن‌دهی معیارها از روش ANP استفاده شده است و نتایج حاصل از وزن‌دهی ANP، با توجه به رابطه زیر، به تک تک لایه‌های اطلاعاتی لحاظ گردیده است.

$$V_{ij} = W_j * (n_{ij} + 1) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن عناصر ماتریس نرمال شده (N) را نشان می‌دهد، w_i ضرایب وزنی معیار را نشان می‌دهد.

۵- تعیین مرز ناحیه شباهت ماتریس (g): در رابطه ۱، v_{ij} عناصر ماتریس وزنی (V) و m تعداد کل گزینه‌های جایگزین را نشان می‌دهد. پس از محاسبه مقدار g_i ماتریس محدوده‌های تقریبی مرزی با توجه به معیارهای G با فرمت $N*1$ شکل می‌گیرد و n تعداد کل معیارهایی را که گزینه‌های ارائه شده برای آنها انتخاب می‌شود را نشان می‌دهد.

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^m v_{ij} \right)^{1/m} \quad \text{رابطه ۲}$$

بنابراین اگر n معیار داشته باشید یک ماتریس $G1 \times n$ به صورت زیر خواهیم داشت (رابطه ۳):

$$[G = [g_1, g_2, \dots, g_n] \quad \text{رابطه ۳}$$

۶- محاسبه فاصله گزینه‌ها تا مرز ناحیه شباهت: در این بخش با استفاده از رابطه ۴، فاصله گزینه‌ها را تا ناحیه g به دست می‌آید. در واقع باید ماتریس وزن‌دار را از ماتریس g کم کرد.

$$Q = V - G \quad \text{رابطه ۴}$$

پس از مشخص شدن ماتریس Q، می‌توان با استفاده از حد بالایی مساحت (G+) و حد پایینی مساحت (G-) وضعیت هر گزینه را مشخص کرد.

۷- انتخاب گزینه بهینه: در روش ماباک MABAC، با استفاده از رابطه ۵، امتیاز نهایی هر گزینه را مشخص کرده و بر اساس آن گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند.

$$S_i = \sum_{j=1}^n (q_{ij}); i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه ۵}$$

محاسبه مقادیر توابع معیار، توسط گزینه‌ها به‌عنوان مجموع فاصله‌های جایگزین از مناطق تقریبی مرزی qi به دست می‌آید. با جمع کردن عناصر ماتریس Q در هر سطر، مقادیر نهایی تابع معیار گزینه‌ها به دست می‌آید. در این رابطه n تعداد معیارها را نشان می‌دهد و m تعداد گزینه است (علیزاده و همکاران ۲۰۲۱).

جدول ۲- نوع توابع فازی‌سازی لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر فرونشست دشت اردبیل

متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	کلاسه‌بندی مجدد و اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
کاربری اراضی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
لیتولوژی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از آبراهه	در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست کاهش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از غسل	در مناطق مجاور غسل، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از شهر و روستا	در مناطق مجاور شهر و روستا، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
افت سطح آب	با کاهش میزان سطح آب چاه‌ها، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهش

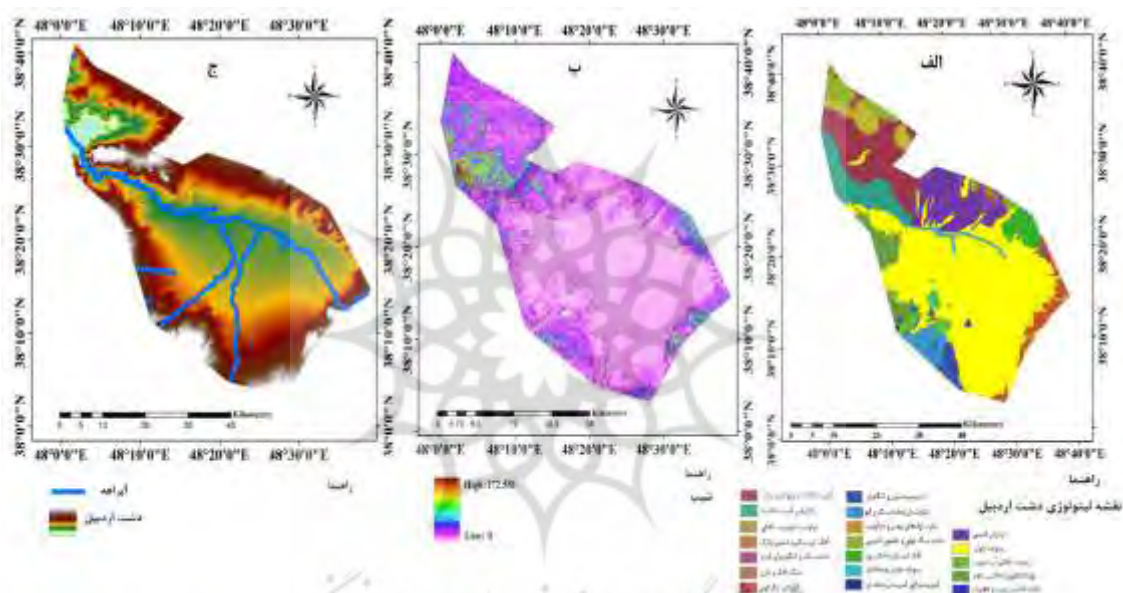
معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل

لیتولوژی: قدیمی‌ترین سازندهای شناخته شده در دشت اردبیل دولومیت و دولومیت آهکی متعلق به ژوراسیک است. رخساره‌های کرتاسه، ماسه سنگ و کنگلومرای قرمز می‌باشد. رخساره‌های دوران سوم شامل ماسه‌سنگ‌های توفی و توفی برشی با میان لایه‌های گدازه آندزیتی، آهک کریستالیزه، آندزیت بازالیت با پیروکسن زیاد مربوط به پالئوژن می‌باشد. آبرفت‌های کواترنر که شامل تراس‌های قدیمی، رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، خاکستر، لاهار، مارن و رسوبات جوان دشت بیشترین سهم را در دشت اردبیل و بخش مرکزی آن که بیشترین میزان تمرکز چاه‌ها و قنات‌ها را دارد، از رسوبات آبرفتی تشکیل شده است که در مرکز و قسمت شرقی دشت بیشترین میزان فرونشست دیده می‌شود و در سایر بخش‌ها به‌واسطه شیب بیش‌تر و نبود رسوبات آبرفتی زمینه برای وقوع فرونشست بسیار کمتر از سایر بخش‌ها است (شکل ۲، الف).

شیب: دشت اردبیل در شمال غرب ایران و در قسمت شرقی فلات آذربایجان به‌صورت حوضه بسته‌ای است که از شمال و غرب منطقه به کوه سبلان و کوه‌های اطراف آن و از شرق و جنوب به رشته‌کوه‌های تالش منتهی می‌گردد؛ بنابراین زمین‌های حاشیه دشت از اطراف به سمت دشت شیب دارند. بررسی وضعیت ارتفاع نشان می‌دهد که در بخش مرکزی دشت کم‌ترین میزان ارتفاع وجود دارد. شواهد فرونشست نیز بیش‌تر در این طبقه ارتفاعی دیده می‌شود. در مورد لایه شیب، محدوده شیب ۵-۰ کمترین میزان شیب در محدوده منطقه می‌باشد که این شیب نقش

مؤثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد، از میزان تمرکز چاه‌ها کاسته و میزان فرونشست زمین هم کاهش می‌یابد (شکل ۲، ب).

فاصله از رودخانه: عامل نزدیک به رودخانه به‌عنوان عامل مزاحم در ایجاد فرونشست شناسایی گردید (شایان و همکاران، ۱۳۹۵) و با فاصله گرفتن از رود امتیاز بیشتری به زمین‌های منطقه تعلق می‌گیرد. هر چه از آبراه‌ها فاصله می‌گیریم نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد (شکل ۲، ج).



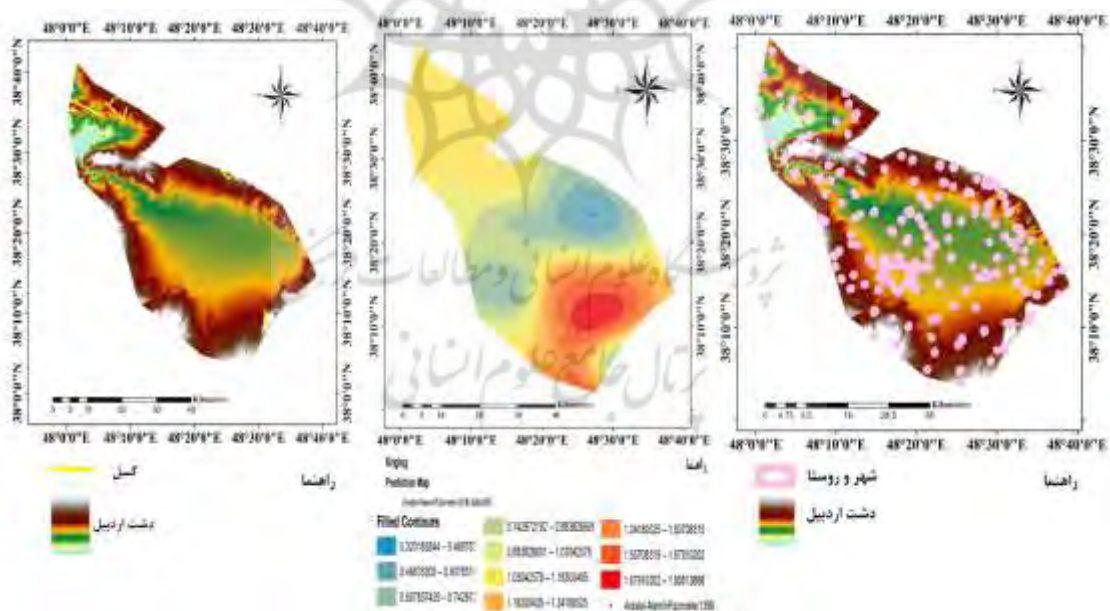
شکل ۲- نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل؛ الف) نقشه لیتولوژی، ب) نقشه شیب، ج) نقشه آبراهه

فاصله از شهر و روستا: عوامل انسان‌ساخت مانند زمین‌های کشاورزی، ابنیه بزرگ و صنعتی، تأسیسات زیرزمینی مانند تونل، خطوط انتقال نیرو و عملیات حفاری و معدن کاری، سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی و شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای با افزایش مصرف آب‌های سطحی، زیرزمینی، تحمیل بار وارده بر زمین در اثر احداث ساختمان‌های بزرگ و تراکم زیرساخت‌ها میزان آسیب‌پذیری این واحد را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست شده‌اند (شکل ۳، الف).

بررسی تراکم چاه‌ها و افت سطح آب: براساس نتایج ارائه شده از مطالعات محققان، به نظر می‌رسد که اعمال فشار بیش از حد بر آبخوان ممکن است موجب بروز پدیده فرونشست شود. از این رو به بررسی وضعیت سفره آب

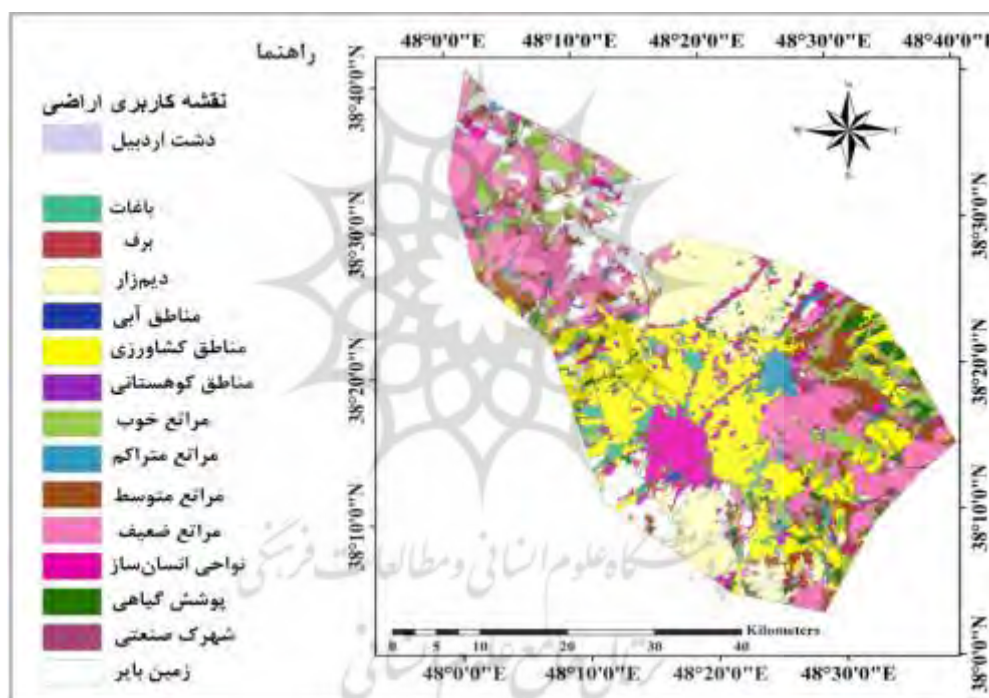
زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه پرداخته شد. به منظور بررسی و ارزیابی نوسانات سطح آب زیرزمینی، از آمار چاه‌های پیزومتری موجود در دشت، میزان افت سطح آب زیرزمینی طی سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۹ محاسبه شد. طبق بررسی‌های انجام شده مشخص است که سطح آب دشت، رو به پایین رفتن است. به طوری که کمترین افت سطح آب ۱/۳ متر و بیشترین ۲۳ متر می‌باشد. علت این افت، برداشت‌های غیراصولی به دلیل افزایش حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق به صورت مجاز و غیرمجاز، کاهش بارندگی در سال‌های اخیر و به تبع آن کاهش آب‌های سطحی در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. بر این اساس بیش‌ترین افت در بخش‌های مرکزی و شرقی دشت مشاهده می‌شود که احتمال وقوع فرونشست در این قسمت از دشت افزایش می‌یابد (شکل ۳، ب).

فاصله از گسل: به دلیل اثر گذاشتن فعالیت گسل‌ها (نظیر زلزله)، بر روی فرونشست زمین، بررسی گسل‌های منطقه ضرورت می‌یابد. گسل‌ها به نوبه خود نقش مؤثر و مهمی در میزان توسعه فرونشست در سطح دشت دارد. به گونه‌ای که هر چه میزان فاصله از خطوط گسل بیش‌تر باشد نشان‌دهنده این است که منطقه تناسب کمتری برای احتمال فرونشست زمین را دارا بوده و هر چه میزان فاصله به خطوط گسل نزدیک‌تر شود احتمال وقوع فرونشست بیش‌تر می‌شود. در دشت اردبیل نیز به علت وجود گسل‌های فراوانی نظیر اردبیل، بزغوش، آستارا و؛ که دارای روند شمال خاوری - جنوب باختری می‌باشد و به همین دلیل ضریب آسیب‌پذیری بالایی دارد (شکل ۳، ج).



شکل ۳- نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل؛ الف) نقشه شهر و روستا ب) نقشه افت آب ج) نقشه گسل

کاربری اراضی: انواع کاربری در دشت اردبیل به صورت نواحی انسان‌ساخت، مرتع خوب، مرتع متراکم، مرتع متوسط، مرتع ضعیف، پوشش برف دائمی، دیم‌زار، مناطق کشاورزی، زمین بایر، باغات و پوشش جنگلی، شهرک صنعتی، مناطق آبی و اراضی بایر می‌باشد. از آن جهت دشت اردبیل دارای توپوگرافی هموار می‌باشد و از آبرفت‌های جوان و تراس‌های قدیم و جدید در اثر ته‌نشست آبرفت‌های رودخانه‌ای با شیب کم تشکیل شده است محل مناسبی برای فعالیت‌های زراعی و باغات ایجاد کرده است. لذا اغلب اراضی کشاورزی و نیز باغات در این واحد گسترده شده است. بررسی معیار کاربری اراضی حاکی از این موضوع است که کاربری اراضی و مراتع و نواحی انسان‌ساز و شهرک صنعتی بیش‌ترین درصد از مساحت مناطق پرخطر را به خود اختصاص داده است؛ که با مصرف بالای منابع آب زیرزمینی جهت مصارف روزانه و آبیاری احتمال وقوع فرونشست را افزایش می‌یابد.

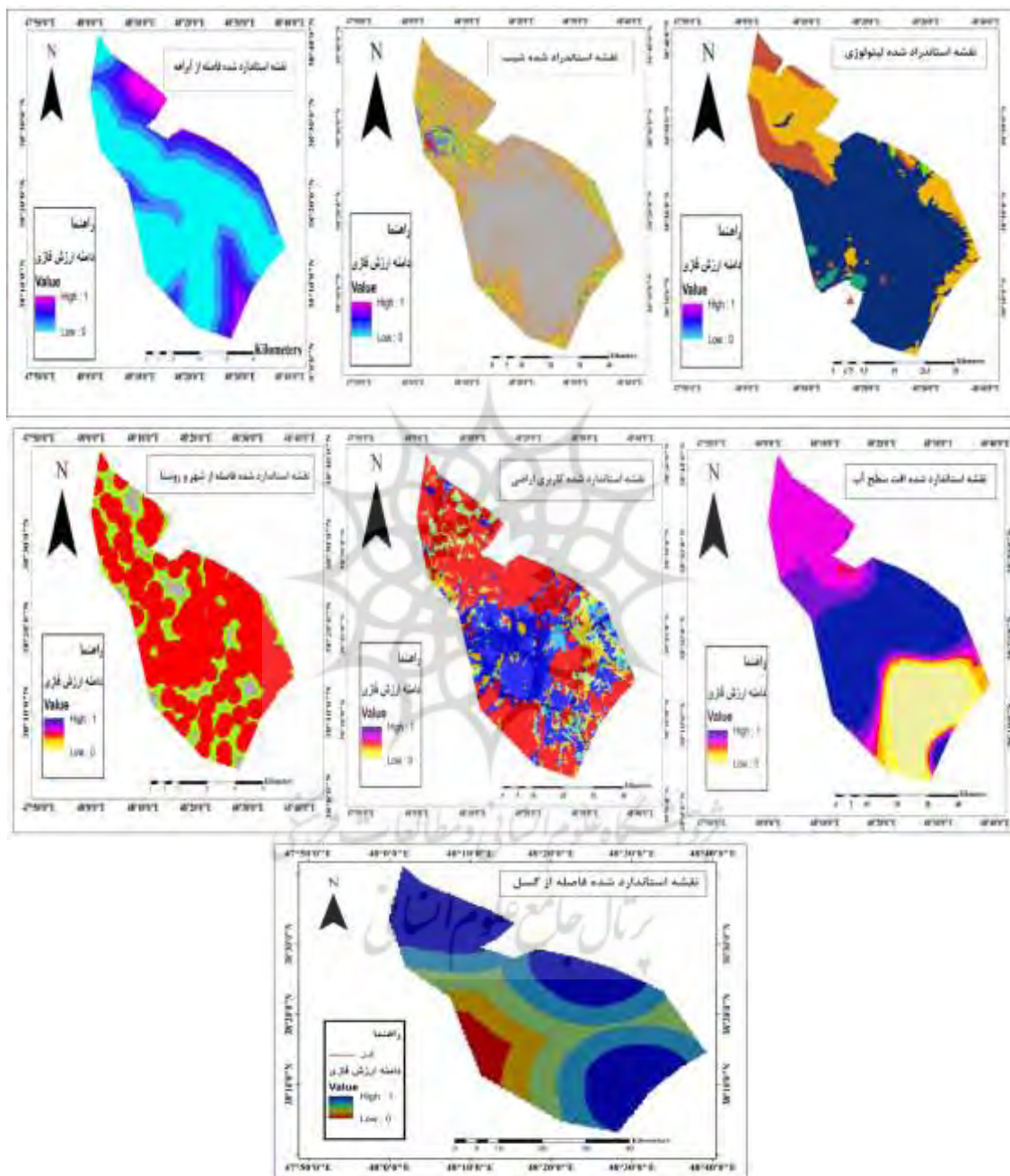


شکل ۴- نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل؛ نقشه کاربری اراضی

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش در اندازه‌گیری معیارها برای بررسی و پهنه‌بندی فرونشست، دامنه متنوعی از مقیاس‌ها وجود دارد؛ از این رو، لازم است معیارها قبل از ترکیب با یکدیگر استاندارد شود. در این مطالعه، مرحله مربوط به ارزش‌گذاری و استانداردسازی به صورت توأم و بر مبنای ارزش عضویت در مجموعه فازی در نظر گرفته شده است. در پژوهش

حاضر، ارزش عضویت بین مقادیر ۰ تا ۱ قرار دارد. نقشه‌های استاندارد شده مربوط به معیارهای مطرح در مطالعه حاضر در شکل ۵، نشان داده شده است.



شکل ۵- نقشه‌های استاندارد شده فازی معیارهای مطرح در پهنه‌بندی فرونشست دشت اردبیل

برای پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت اردبیل ابتدا وزن‌دهی معیارها انجام شد. پس از محاسبه سوپرماتریس غیروزنی یا اولیه مربوط به مدل، سوپرماتریس غیروزنی و سوپرماتریس حدی، آخرین مرحله برای تعیین ارزش و ضریب نهایی عناصر، محاسبه نتایج ماتریس خوشه‌ها و نرمال‌سازی ضریب عناصر در سوپرماتریس حدی توسط ضریب خوشه‌ها می‌باشد، نتیجه مقایسات زوجی بین گروه‌ها که جدول اوزان گروه‌ها نامیده می‌شود، در جدول (۳)، آورده شده است.

جدول ۳- ماتریس اوزان گروه‌ها

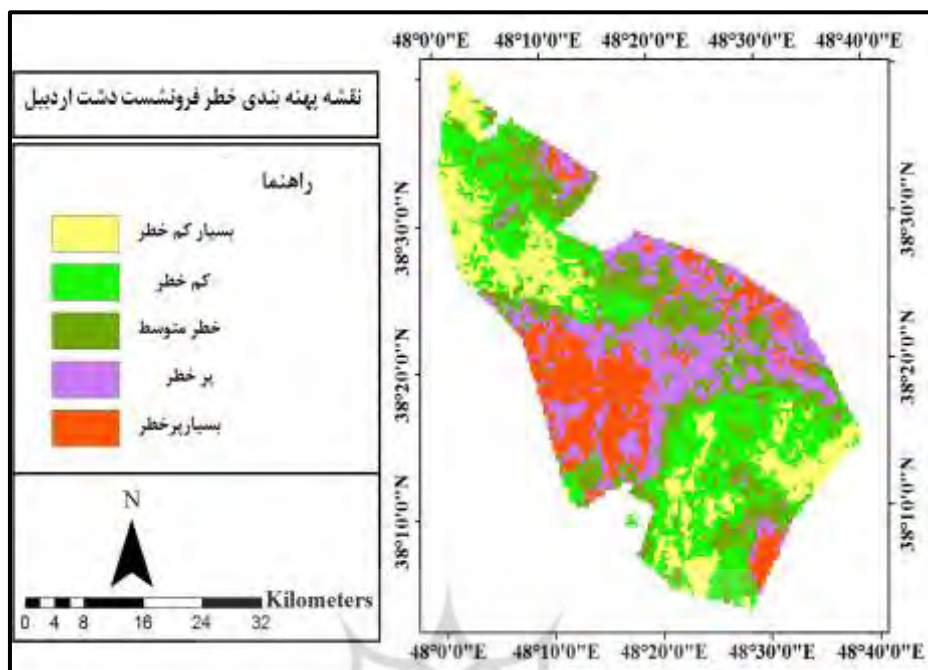
خوشه‌ها	انسانی	زمین‌ساختی	فیزیوگرافی	هیدرولوژی
انسانی	۰/۲۵۲	۰/۲۲۰	۰/۳۳۳	۰/۳۱۲
زمین‌ساختی	۰/۰۹۹	۰/۳۸۸	۰/۳۳۳	۰/۲۹۱
فیزیوگرافی	۰/۸۸۴	۰/۸۸۰	۰/۰۰۰	۰/۰۸۴
هیدرولوژی	۰/۵۶۰	۰/۳۰۵	۰/۳۳۳	۰/۳۱۲

نتیجه نهایی عناصر: ضرایب سوپرماتریس در ضرایب ماتریس خوشه‌ها نرمال شده و در نهایت، نتیجه نهایی عناصر و اولویت آن‌ها مشخص شد (جدول ۴)، که معیارهای افت سطح آب چاه‌های موجود در منطقه، فاصله از رودخانه، لیتولوژی و کاربری اراضی به ترتیب بیشترین تأثیر را در فرونشست دشت اردبیل را داشته‌اند.

جدول ۴- وزن نهایی حاصل از روش ANP

معیار	فاصله از شهر و روستا	کاربری اراضی	فاصله از غسل	لیتولوژی	شیب	افت سطح آب	فاصله از رودخانه
وزن نهایی	۰/۱۲۷	۰/۱۴۷	۰/۱۲۳	۰/۱۵۲	۰/۰۶۱	۰/۲۲۱	۰/۱۶۶

پس از اعمال کردن وزن‌های حاصل از روش ANP در هر یک از نقشه‌های استاندارد شده و پیاده‌سازی دیگر مراحل مدل MABAC، نقشه نهایی پهنه‌بندی فرونشست در ۵ طبقه بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، به دست آمد (شکل ۶). با توجه به نتایج به دست آمده، ۲۴۴/۲۹ کیلومتر مربع از مساحت شهرستان در طبقه بسیار پرخطر و ۳۷۰/۵۹ کیلومتر مربع، در طبقه پرخطر قرار دارد. همچنین ۳۸۲/۷۵ کیلومتر مربع از مساحت دشت، دارای خطر متوسط و به ترتیب ۴۴۱/۲۶ و ۲۸۶/۷۱ کیلومتر مربع دارای خطر بسیار کم و کم می‌باشند (جدول ۵).



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت اردبیل

جدول ۵- مساحت مربوط به هر یک از طبقات خطر

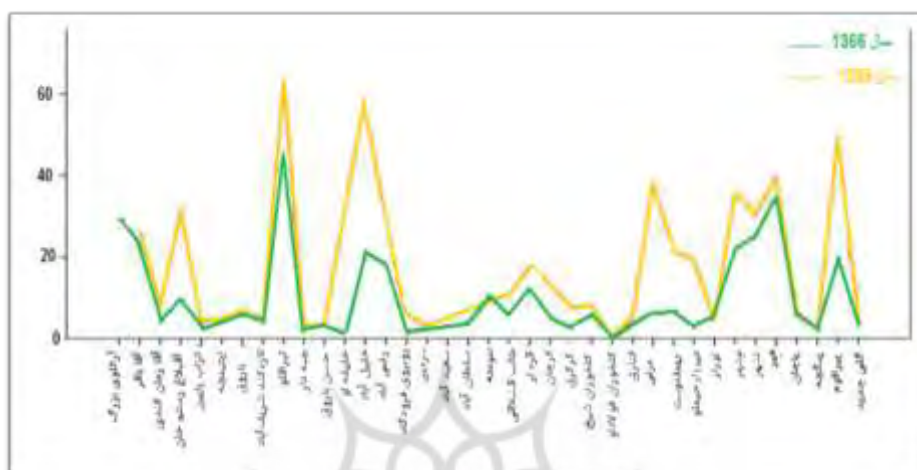
بسیار کم خطر	کم خطر	خطر متوسط	پر خطر	بسیار پر خطر	طبقه خطر
۲۸۶۷۱	۴۴۱/۲۶	۳۸۲/۷۵	۳۷۰/۵۹	۲۴۴/۲۹	مساحت به کیلومتر مربع
۱۶/۶۳	۲۵/۵۷	۲۲/۱۸	۲۱/۴۷	۱۴/۰۸	مساحت به درصد

طبق بررسی‌های انجام شده و نتایج به دست آمده ۳۵/۵۵ درصد از منطقه مورد مطالعه در پهنه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد. با بررسی و محاسبه موردی معیارهای تأثیرگذار بر فرونشست و پراکنش آن‌ها در پهنه بسیار پرخطر می‌توان بیان کرد که فاصله از رودخانه که طبق جدول (۴)، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین معیار در فرونشست منطقه مورد مطالعه می‌باشد و هر چه از آبراهه‌ها فاصله می‌گیریم، نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌ها، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد. لذا ۴۲/۳۲ کیلومتر از منطقه بسیار پرخطر در فاصله ۱۶۰۰۰ متری از رودخانه، ۷۶/۶۸ کیلومتر در فاصله ۱۴۰۰۰ متری و ۶۱/۷۶ کیلومتر مربع در فاصله ۱۲۰۰۰ متری از رودخانه قرار دارد. هر چه میزان فاصله به خطوط گسلی نزدیک‌تر باشد احتمال وقوع فرونشست افزایش می‌یابد و هر چه میزان فاصله از خطوط گسلی بیشتر باشد نشان‌دهنده این است که منطقه تناسب کم‌تری را برای احتمال فرونشست دارا می‌باشد.

۱۳۴/۷۱ کیلومتر از پهنه بسیار پرخطر در فاصله ۵۰۰۰ متری از گسل، ۸۰/۹۸ کیلومتر در فاصله ۱۰۰۰۰ متری، ۲۱/۳۵ کیلومتر در فاصله ۱۵۰۰۰ متری و ۰/۶۶ کیلومتر در فاصله ۲۰۰۰۰ متری از گسل قرار دارد. بیشترین احتمال وقوع فرونشست در محدوده شیب بین ۰ تا ۵ درصد اتفاق می‌افتد زیرا این شیب نقش مؤثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد از میزان تمرکز چاه‌ها کاسته و میزان فرونشست زمین هم کاهش می‌یابد. ۱۲۷ کیلومتر از منطقه بسیار پرخطر در محدوده شیب ۰ تا ۱۵ درصد، ۸۱/۹ کیلومتر در شیب ۱۵ تا ۳۰ درصد و ۳۵/۱ کیلومتر در محدوده شیب ۳۰ تا ۴۵ درصد قرار دارد. عوامل انسان‌ساخت مانند ابنیه‌های بزرگ و صنعتی، تأسیسات زیرزمینی، عملیات حفاری، شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای و سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی با تحمیل بار وارده بر زمین، میزان آسیب‌پذیری را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست می‌شود به همین دلیل بیش‌ترین میزان فرونشست در پهنه بسیار پرخطر در فاصله ۲۰۰۰۰ متری از شهر و روستا با ۱۳۴/۰۹ کیلومتر، در فاصله ۴۰۰۰۰ متری از ۸۰/۲۰ کیلومتر، در فاصله ۶۰۰۰۰ متری ۲۱ کیلومتر و در فاصله ۸۰۰۰۰ متری ۶۶ کیلومتر قرار دارد. آبرفت‌های کواترنر که شامل تراس‌های قدیمی، رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، خاکستر، لاهار، مارن و رسوبات جوان دشت بیشترین سهم را در دشت اردبیل و بخش مرکزی آن که بیش‌ترین میزان تمرکز چاه‌ها و قنات‌ها را دارد، از رسوبات آبرفتی تشکیل شده است که در مرکز و قسمت شرقی دشت بیش‌ترین میزان فرونشست دیده می‌شود و در سایر بخش‌ها به‌واسطه شیب بیش‌تر و نبود رسوبات آبرفتی زمینه برای وقوع فرونشست بسیار کم‌تر از سایر بخش‌ها است. رسوبات جوان رودخانه‌ای و دشت با ۱۲۹/۶۰ کیلومتر، مارن، کنگلومرا، توف، خاکستر، لاهار و تراس‌های قدیمی ۷۶/۳۷ کیلومتر، رسوبات آهکی شیرین و تراورتن، تناوب توف‌ها، سنگ‌آهک و مارن و ماسه‌سنگ توفی ۳۲ کیلومتر از مساحت پهنه بسیار پرخطر را شامل می‌شوند.

بررسی معیار کاربری اراضی حاکی از این موضوع است که مناطق کشاورزی با ۲۷۸ کیلومتر، نواحی انسان‌ساز ۲۶۵/۹ کیلومتر، دیم‌زار ۸۸/۳ کیلومتر، مناطق آبی ۹۸/۸ کیلومتر، مراتع خوب ۱۵۵/۶ کیلومتر، مراتع متوسط ۱۷۸/۸ کیلومتر، مراتع ضعیف ۶۷/۲ کیلومتر، پوشش گیاهی ۱۹۷/۴، مراتع متراکم ۹۹/۵ کیلومتر، باغات ۱۶۹/۳ کیلومتر و شهرک صنعتی ۱۳۲/۹ کیلومتر مساحت مناطق بسیار پرخطر تا کم خطر را به خود اختصاص داده است. مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی به دلیل بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد. همچنین مناطق سکونت‌گاهی نیز به دلیل ساخت‌وسازها و وجود ابنیه‌های بزرگ و سنگین مستعد وقوع فرونشست هستند. با توجه به اینکه عمده محصولات کشاورزی زیر کشت دشت اردبیل گندم، جو و سیب‌زمینی می‌باشد که نیاز آبی بالایی برای رشد دارند و کاهش چشم‌گیر بارندگی و کمبود منابع آب‌های سطحی در سال‌های اخیر لزوم استفاده از منابع آب‌های زیرزمین را بالا برده و همین مساله سبب افت بیش‌تر منابع آب زیرزمینی در منطقه شده است. نتایج کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه و پراکنش فرونشست در این پژوهش نشان می‌دهد که به دلیل

رشد سریع جمعیت و توسعه صنعت و کشاورزی، تقاضای آب نیز بسیار زیاد می‌باشد. با این حال بهره‌برداری بیش از حد آب‌های زیرزمینی به دلیل کمبود منابع آب‌های سطحی آشکار است که منجر به فرونشست زمین می‌شود و باعث آسیب به جاده‌ها، پل‌ها، لوله‌های آب زیرزمینی و سایر تأسیسات شهری می‌شود.



شکل ۷- تغییرات میانگین سطح ایستابی چاه‌های پیزومتري دشت اردبیل

در دشت اردبیل قبل از دهه ۶۰ و ۷۰ تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق در مقایسه با چاه‌های دستی یا نیمه عمیق انگشت‌شمار بود. در نتیجه برداشت از منابع آب زیرزمینی در حد محدود انجام می‌گرفته است. از سال ۶۸ به بعد استفاده از وسایل و دستگاه‌های حفاری، تعداد چاه‌های حفر شده در دشت اردبیل رو به افزایش نهاد و با رونق کشاورزی از دهه ۷۰ به بعد و به تبع آن افزایش بی‌رویه برداشت از سفره مذکور شروع به افت سطح آب زیرزمینی کرد. تداوم این وضعیت در سال‌های بعدی به‌خصوص از سال ۱۳۸۵ به بعد باعث بحرانی شدن وضعیت این دشت از بابت افت سطح آب و فرونشست شده است. کاهش آبدهی چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌ها و تغییر محل و کف‌شکنی چاه‌ها و در نتیجه تحمیل هزینه‌ای گزاف در این خصوص به صاحبان چاه‌ها، افت کیفی منابع آب و شور شدن تدریجی، ایجاد محدودیت در مصارف کشاورزی، صنعت و شرب، نشست‌زمین و کاهش ظرفیت حجم مخزن طبیعی از تبعات افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل است. با استفاده از اطلاعات به دست آمده می‌توان گفت که قسمت شرقی و مرکزی دشت اردبیل بیش‌ترین تغییرات را به لحاظ افت سطح آب زیرزمینی داشته‌اند که به علت مساعد بودن شرایط کشاورزی و بالا بودن سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی بالا و تراکم چاه‌های عمیق حفر شده، برداشت از آب زیرزمینی در منطقه ذکر شده فراوان بوده و به همین دلیل میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی بالا می‌باشد. جهت بررسی وضعیت و تأثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی و تأثیر آن بر میزان فرونشست

دشت اردبیل از اطلاعات ۳۹ چاه پیزومتری (اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای اردبیل)، طی سال‌های ۶۶ تا ۹۹ (شکل ۷)، که نتایج تحلیل از کاهش ۴۸ درصدی سطح ایستابی را در سال ۹۹ نسبت به سال ۶۶ نشان می‌دهد. بیشینه سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری از ۴۵ متر به بیش از ۷۰ متر در سال ۹۹ رسیده است که حاکی از وخامت اوضاع آبخوان دشت اردبیل است.

بررسی‌های زمینی مؤید وجود تعداد کثیری شواهد و رخنمون‌های مورفولوژیکی ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی و نشست زمین در دشت اردبیل می‌باشد. از جمله می‌توان به درز و ترک‌های روی دیوار منازل (شکل ۸) و ترک و نشست جاده‌ها و خیابان‌های شهر اردبیل اشاره کرد و ترک‌هایی که در روی زمین‌های کشاورزی شکل گرفته سبب توسعه فرسایش شده است. به گونه‌ای که این درز و ترک‌ها باعث کاهش کیفیت زمین‌های کشاورزی و از بین رفتن آن‌ها و آسیب به سیستم آبیاری شده است.



شکل ۸- ترک‌های شکل گرفته ناشی از فرونشست در دشت اردبیل

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش خطر فرونشست در دشت اردبیل، با استفاده از تلفیق روش‌های ANP و MABAC، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان داد، عوامل افت سطح آب (جزو عوامل هیدرو اقلیمی)، فاصله از آبراهه (جزو خوشه عوامل هیدرو اقلیمی)، لیتولوژی (جزو خوشه زمین‌ساختی)، به ترتیب با مقدار ۰/۲۲۱، ۰/۱۶۶، ۰/۱۵۲، بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند. **فرزین کیا و همکاران (۱۴۰۰)**، نیز در مطالعه‌ای که در آن به پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت جویین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای - فازی پرداخته‌اند؛ سطح چاه‌های پیزومتری، تراکم چاه‌ها و فاصله از رودخانه را به‌عنوان مهم‌ترین عوامل بیان کرده‌اند. **شایان و همکاران (۱۳۹۵)**، در مطالعه‌ای با عنوان پهنه‌بندی خطر فرونشست در حوضه‌ای آبخیز قره‌چای همدان به این نتیجه رسیدند که تغییرات ناهمسان در داده‌های مورفومتری شبکه زهکشی مهم‌ترین فاکتور مؤثر در تشدید افت آب‌های زیرزمینی و وقوع

فرونشست در منطقه بوده و عوامل لیتولوژیکی و انسانی به‌تنهایی نقش ندارند. با توجه به بررسی نقش و اهمیت هر یک از عوامل دخیل در شکل‌گیری فرونشست و نیز نتایج حاصل از به‌کارگیری روش تحقیق و تجزیه و تحلیل نهایی با استفاده از روش ماباک، به‌عنوان یکی از روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره، به ترتیب ۲۹/۲۴۴ و ۵۹/۳۷۰ کیلومتر مربع از محدوده مطالعاتی در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد. با توجه به نقشه پهنه‌بندی فرونشست، دشت اردبیل دارای احتمال خطر بالا، مناطق بسیار پرخطر، به‌طور عمده در شیب ۰ تا ۱۵ درصد، سازندهای نامقاوم و نیمه‌مقاوم، که عمدتاً سازندهای سست کواترنری (رسوبات جوان رودخانه‌ای، رسوبات آهکی تراورتن، توف، لاهار، مارن)، کاربری‌های زراعی، انسان‌ساخت و مراتع، محدوده چاه‌های پیزومتری و عمیق، محدوده نزدیک گسل و در مناطق با فواصل دور از آبراهه‌ها قرار دارند. همچنین می‌توان گفت که نتایج حاصل از این مطالعه، حاکی از توان بالای دشت اردبیل، از لحاظ رخداد فرونشست می‌باشد. لذا قلمروهای پرخطر تعیین شده در این پژوهش اراضی هستند که نباید کارهای غیر اصولی از قبیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، کاشت محصولات با نیاز آبی بالا انجام گیرد. همچنین این امر نیازمند شناسایی عوامل تأثیرگذار، اقدامات کاهش‌دهنده و اقدامات تطبیق‌دهنده از جمله محدود یا ممنوعیت استخراج آب‌های زیرزمینی در مناطق در معرض فرونشست و اجرای مقررات سخت‌گیرانه جهت استخراج‌کنندگان منابع آب زیرزمینی در مناطق در معرض فرونشست و پایش پیوسته شاخص‌های فرونشست است. به‌طور کلی ایجاد چنین شرایط و وضعیتی در رویداد پدیده فرونشست و پیامدهای مخاطره‌آمیز و فاجعه‌بار آن برای کشور، قبل از هر چیزی عزم ملی برای پذیرش و مقابله با این پدیده به‌عنوان یک معضل و مخاطره منتهی به یک فاجعه را طلب می‌نماید. موضوعی که درک آن از یک سو مستلزم افزایش مطالعات برای شناسایی کامل نواحی مستعد به‌صورت یک طرح ملی است. از طرفی لازم است زیرساخت لازم برای آگاهی‌رسانی و همگانی بودن اطلاع از نتایج و معضلات ناشی از این مسئله برای مردم در جهت مشارکت آن‌ها در جهت جلب مشارکت مردم و مسئولان و تعدیل زیرساخت‌های ایجابی فراهم گردد؛ و نهایتاً برای پیشگیری و کاهش و تعدیل حجم دامنه فاجعه محتمل از این مخاطره، دستگاه‌های ذی‌ربط تمامی مقررات و استانداردهای لازم ساخت‌وساز را برای نواحی در معرض فرونشست، موردبازنگری قرارداد و اساس را بر شرایط نوین تعریف نماید. درنهایت می‌توان اذعان داشت با توجه به این امر که فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومه آن، در محدوده مورد مطالعه آسیب برساند، از این رو، بایستی راهکارهای بلندمدت به‌صورت اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب و راهکارهای کوتاه‌مدت به‌صورت، جلوگیری از برداشت سفره‌های آب زیرزمینی به اشکال مختلف و پایش مستمر مناطق مستعد این پدیده، ایجاد سدهای زیرزمینی به‌منظور افزایش تراز آب و کاهش فرونشست، مهار آب‌های سطحی و اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی، توقیف تجهیزات حفاری غیرمجاز، تهیه و نصب دستگاه‌های کتور

هوشمند، ایجاد تشکلهای آب‌بران و حمایت از این تشکلهای، ایجاد و استقرار بازار محلی آب و ساماندهی شرکت‌های حفاری، کنترل شدید مصرف آب، فرهنگ‌سازی مصرف و تغییر الگوی مصرف، مورد توجه مسئولان مربوطه و همچنین ساکنان محلی قرار گیرد.

کتابنامه

- آمیغ‌پی، معصومه؛ عربی، سیاوش؛ ۱۳۸۸. بررسی فرونشست یزد با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و ترازیبی دقیق. طرح پژوهشی سازمان نقشه‌برداری کشور. صص ۴۶-۱.
<https://sid.ir/paper/32299/fa>
- ابراهیمی، عطرن؛ قاسمی، افشان؛ گنجائیان، حمید؛ ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. فصلنامه جغرافیا و روابط انسانی. دوره ۲. شماره ۴. صص ۲۹-۴۱
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1>
- بهباری، مهدی؛ علیزاده، اکرم؛ محمودیان، شهاب؛ ۱۳۹۶. ارزیابی تأثیر ساختارهای فعال بر خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند متغیره. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. دوره ۷. شماره ۲. صص ۵۶-۴۹
<https://doi.org/10.22055/aag.2017.13229>
- جوادی، سید محمدرضا؛ ۱۴۰۰. برآورد و تحلیل میزان فرونشست دشت همدان - بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS. رساله دکتری. دانشگاه تبریز. استاد راهنما دکتر معصومه رجبی. صص ۱۵۶-۱.
 حاجب، زهرا؛ موسوی، زهرا؛ معصومی، زهره؛ رضایی، ابوالفضل؛ ۱۳۹۷. بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل‌سنجی راداری. مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. صص ۳۵۵-۳۵۲.
<https://sid.ir/paper/31521/fa>
- حسین‌آبادی، سعید؛ اکبری، ابراهیم؛ نقد‌بیشی، ابراهیم؛ ۱۳۹۹. ارزیابی و شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از طبقه‌بندی شیء‌گرا و مدل زنجیره مارکوف (مورد مطالعه: شهر بیرجند و پیرامون آن). نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره سی و سوم. صص ۱۸۸-۱۶۹.
<https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.81819>
- رستم‌زاده، هاشم؛ اسدی، اسماعیل؛ جعفرزاده، جعفر؛ ۱۳۹۴. بررسی سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت اردبیل. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. سال دوم. شماره یک. صص ۴۲-۳۱.
<https://sid.ir/paper/264771/fa>
- زارعی، کیوان؛ رسول‌زاده، علی؛ صدیقی، مرتضی؛ احمدزاده، غلامرضا؛ رضائی مقدم، جواد؛ ۱۳۹۹. تعیین رابطه فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی با دو روش تداخل‌سنجی راداری و ایستگاه ثابت GPS (مطالعه موردی: دشت سلماس). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. سال یازدهم. شماره چهل و یکم. صص ۱۵-۱
<https://www.magiran.com/paper/2180181>
- شادفر، صمد؛ نصیری، اسماعیل؛ چیتگر، سکینه؛ احمدی، علی؛ ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) مطالعه موردی: بوئین شهر. فصلنامه جغرافیایی سرزمین. سال دوازدهم. شماره ۴۸. صص ۱۸-۱.
<https://sid.ir/paper/116305/fa>

- شاه کرمی، نازنین؛ قاسمی، شب‌نم؛ ۱۳۹۹. مناطق فرونشست در اثر اضافه برداشت آب زیرزمینی در دشت اراک. چهارمین مجمع توسعه فناوری و کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین عمران معماری و صنعت ساختمان ایران. صص ۱۳-۱. <https://civilica.com/doc/1031421>
- شایان، سیاوش؛ یمانی، مجتبی؛ یادگار، منیژه؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان. هیدروژئومورفولوژی. شماره ۹. صص ۱۵۸-۱۳۹. <https://sid.ir/paper/520002/fa>
- شریفی کیا، محمد؛ ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنج راداری در دشت نوق-بهرامان. مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا. دوره شانزده. شماره سوم. صص ۷۳-۵۵. <http://hsm.sp.modares.ac.ir/article-۵۰۷۶-۲۱fa.html>
- شفیعی، نجمه؛ گلی مختاری، لیلما؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان؛ ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. صص ۱۱۱-۹۳. <https://doi.org/10.22034/GMPJ.2020.106424>
- شمشکی، امیر؛ بلورچی، محمدجواد؛ انصاری، فرهاد؛ ۱۳۸۴. بررسی فرونشست زمین در دشت تهران-شهریار. طرح پژوهشی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. شماره گزارش ۸۴-۰۶/۲۰-Engeo صص ۸۴-۱. <https://gsi.ir/fa>
- شمشکی، امیر؛ بلوری محمدجواد؛ انتظام سلطانی ایمان؛ ۱۳۹۴. فرونشست زمین در شهر تهران و عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن. بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین. صص ۱۲-۱. <https://civilica.com/doc/210280>
- عابدینی، موسی؛ آقایی، لیلما؛ اصغری سکانرود؛ ۱۴۰۱. برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال یازدهم. شماره ۱. تابستان ۱۴۰۱. صص ۱۳۲-۱۱۷. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1401.11.1.7.9>
- عابدینی، موسی؛ خان بیگی، علی؛ موس پور، توحید؛ حسین دانشور؛ ۱۳۹۵. تعیین مناطق احتمالی فرونشست دشت روانسر-سنجابی با استفاده از GIS و AHP. دومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری. شرکت کیان تایر و جهاد دانشگاهی آذربایجان شرقی. <https://civilica.com/doc/526049>
- عابدینی، موسی؛ ۱۳۸۸. بررسی مسائل هیدروژئومورفولوژی و فرونشست ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل و راهکارها. دانشگاه محقق اردبیلی. مجموعه مقالات. <https://civilica.com/doc/335178>
- عابدینی، موسی؛ ۱۳۹۲. بررسی علل فرونشست دشت اردبیل و اثرات آن در محدوده شهر. فصلنامه علمی-پژوهشی. جغرافیای طبیعی. شماره ۱۹. صص ۸۴-۷۱. <https://sid.ir/paper/184972/fa>
- عابدینی، موسی؛ پیروزی، الناز؛ شکرزاده، الهام؛ ۱۴۰۰. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه‌ی موردی: شهرستان نیر). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال دهم. شماره ۲. تابستان ۱۴۰۰. صص ۱۵۵-۱۳۶. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2021.215108.1214>

- عابدینی، موسی؛ ۱۳۹۶. مبانی فرونشست زمین (مخاطرات هیدروژئومورفولوژی و مدیریت محیط). انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی. چاپ یکم. ۲۳۰ صفحه.
- عالی پور اردی، مهدی؛ ملک محمدی، بهرام؛ جعفری، حمیدرضا؛ ۱۳۹۶. پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. سال ۱۱. شماره ۳۸. صص ۳۴-۲۵.
<https://sid.ir/paper/134810/fa>
- فتح‌الله، نرگس؛ آخوندزاده؛ مهدی؛ بحرودی، عباس؛ ۱۳۹۷. بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. دوره ۲۷. شماره ۱۰۵. صص ۳۴-۲۴
<https://civilica.com/doc/795768>
- فرزین‌کیا، ربابه؛ امیر احمدی، ابوالقاسم؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ زندی، رحمان؛ ۱۴۰۰. پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت جوین با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای - فازی. فصلنامه علمی فضایی جغرافیایی دانشگاه آزاد اهر. سال بیست و یکم. شماره ۷۳. صص ۷۱-۵۱.
<https://www.sid.ir/files/server/jf/40014007404.pdf>
- فرجی سبکبار، حسنعلی؛ بدری، سید علی؛ مطیعی، سیدحسین؛ شرفی، حجت‌الله؛ ۱۳۸۹. سنجش میزان پایدار نواحی روستایی بر مبنای مدل تحلیل شبکه، با استفاده از تکنیک بردا مطالعه موردی: نواحی روستایی شهرستان فسا. پژوهش‌های جغرافیایی انسانی تابستان ۱۳۸۹ شماره ۷۲.
<http://ensani.ir/fa/article/260904>
- فنی، زهره؛ فشمی، سید محمدرضا؛ ۱۳۹۶. پهنه‌بندی و تحلیل فضایی مخاطرات چهارگانه محیطی زمین‌لغزش، سیل، زلزله و فرونشست موردپژوهشی: مناطق ۲۲ گانه شهر تهران. فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. دوره ۲۷ شماره ۱۰۸. صص ۱۴-۱.
[10.22131/sepehr.2019.34621](https://sepehr.2019.34621)
- فیض‌زاده، بختیار؛ هلالی، حسین؛ ۱۳۸۹. مقایسه روش‌های پیکسل پایه، شیء‌گرا و پارامترهای تأثیرگذار در طبقه‌بندی پوشش کاربری اراضی استان آذربایجان غربی. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی. سال چهل و دوم. شماره ۷۱. صص ۱۱۷-۱۰۷.
https://jphgr.ut.ac.ir/article_21550.html
- کوه‌بنانی، حمیدرضا؛ یزدانی، محمدرضا؛ حسینی، سید کیوان؛ ۱۳۹۸. پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کاشمر و خلیل‌آباد). مدیریت بیابان. ۷ (۱۳). صص ۶۵-۷۶.
<https://sid.ir/paper/252819/fa>
- کیانی، فاطمه؛ عابدینی، موسی؛ غلامرضا احمدزاده؛ ۱۳۹۶. بررسی پتانسیل فرونشست شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS. تهران. سومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری و اولین کنفرانس هنر. معماری و مدیریت شهری بین‌المللی.
<https://civilica.com/doc/688569>
- محمودی، پیمان؛ علیجانی، بهلول؛ ۱۳۹۲. مدل‌بندی رابطه بارش‌های سالان و فصلی با عوامل زمین اقلیم در کردستان. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. سال ۱۳. شماره ۳۱. صص ۱۱۲-۹۳
<http://jgs.khu.ac.ir/article-۹۹۹۹-۱-fa.html>
- مدنی، حسن؛ شفیقی، سیروس؛ ۱۳۹۶. زمین‌شناسی عمومی. انتشارات دانشگاه امیرکبیر. ۴۸۲ ص.

منتظریون، مریم؛ اصلانی، فرشته؛ ۱۳۹۸. ارزیابی خطر فرونشست با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان‌های تهران و البرز. *فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران*. دوره نهم. شماره اول. صص ۱۳-۱.

DOI:20.1001.1.23225955.1398.9.1.3.2

- Abdulaziz, Aljammaz, Sultan, Mohamed, Izadi, Moein, Abotalib Abotalib Z., 2021. Land Subsidence Induced by Rapid Urbanization in Arid Environment5455s: A Remote Sensing-Based Investigation, A Remote Sensing-Based Investigation, p1-24. [https:// doi.org/ 10.3390/ rs13061109](https://doi.org/10.3390/rs13061109)
- Aher, P. Adinarayana, J.; and Gorantiwar, SD., 2013. Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through the fuzzy analytical hierarchy process. *Agric Eng Int CIGR J*, 15(1):11–18 <http://www.cigrjournal.org>
- Alizadeh, R; Izadi, H; Arasteh,M., (2021). Ranking of nature-based tourism capacity in mountainous areas, case study: Eastern region of Lorestan province. *Planning and arranging space*. 25 (1): 117-142. <https://hsmasp.modares.ac.ir/article-21-46361-en.html>
- Arab Ameri, A., Pourghasemi, H.R., Cerda. A., (2018), Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717325615>
- Bou kheir, R.; Cerdan, O.; and Abdelah, C., 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82: 347-359. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.05.012>
- Chaofan, Zhou, Huili, Gong, Beibei, Chen, Mingliang, Gao, Qun, Cao, Jin, Cao, Li Duan, Junjie, Zuo, Min, Shi,2019. Land Subsidence Response to Di_erent Land Use. *Types and Water Resource Utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China, Remote Sens*, pp1-22 [10.3390/rs12030457](https://doi.org/10.3390/rs12030457)
- Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the ebro valley evaporate karst (NE Spain). *Geomorphology*,111(3),160-172 [https:// doi.org/ 10.1016/ j.geomorph.2009.04.017](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.04.017)
- Galve, j.p. Gutierrez, f., Remondo, j., Bonachea, J., Lucha, p., Cenrero,A.2009.
- Gambolati, and Massimillano, F, Teatro. F., 2006. AnthropogenicLandSubsidence, GROUNDWATER. DOI: 10.1002, PP 2444-2457.
- Georgiou, D.; Mohammed, E.S.; and Rozakis, S., 2015. Multi-criteria decisionmaking on the energy supply configuration of autonomous desalination units. *Renew. Energy*, 75: 459–467. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.036>
- Guoman Huang, Haitao Fan, Lijun Lu, Wenqing Yu., 2020. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-pp 1-6*.
- Hoseini H., 2019. Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation, *Information Processing in Agriculture*, 6 (1): 11-19 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317318302208>
- Hwang, c., Yang, y., kao, R., Han, j., Hung, W.C., Cheng s., Li, f., 2016. Time varying land subsidence detected by radar altimetry; California Taiwan and north china, *scientific reports*. 6: 28160 <https://doi.org/10.1038/srep28160>
- Qui T, Nguyen., 2016. Sustainable Development of Civil, Urban and Transportation Engineering ConferenceThe Main Causes of Land Subsidence in Ho Chi Minh City, *Procedia Engineering*, 142, pp 33. <https://cyberleninka.org/article/n/584825>

- Raucooules, D, Colesanti, C, Carnec Carnec, C., 2007. Use of SAR interferomet for detectingand assessing ground subsidence, C.R, Geoscience 339, 289-302 <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.02.002>.
- Stephen, A, Nelson., 2016. Surface Subsidence and Collapse, Natural Disasters, on 03.PP1-10.

